



Certificación ISO 9001:2008 ‡

Gestión de terraplenes y riesgos ante la inestabilidad

Paul Garnica Anguas
José Antonio Ramírez Culebro

Publicación Técnica No. 423
Sanfandila, Qro, 2014

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

**Gestión de terraplenes y riesgos ante la
inestabilidad**

Publicación Técnica No. 423
Sanfandila, Qro, 2014

Esta investigación fue realizada en la Coordinación Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Paul Garnica Anguas y el M.I. José Antonio Ramírez Culebro.

Contenido

Resumen		iii
Abstract		iv
Resumen	Ejecutivo	v
Capítulo 1.	Introducción	1
Capítulo 2.	Importancia de la gestión de terraplenes	3
Capítulo 3.	Metodología para la evaluación de estabilidad de terraplenes carreteros.	23
Capítulo 4.	Metodología para evaluar el peligro de terraplenes carreteros.	27
Capítulo 5.	Evaluación del tramo en estudio.	51
Capítulo 6.	Conclusiones.	101
Bibliografía		105

Resumen

La necesidad del hombre por estimar el riesgo y la confiabilidad de los terraplenes, ha propiciado el desarrollo de distintos métodos, procedimientos y técnicas que le ayudan a tener una mayor certidumbre de las posibles causas, consecuencias y efectos que implicaría el que la estructura terrea fallase.

Al hablar de gestión nos referimos a la administración eficiente de los recursos necesarios para mantener a los terraplenes en buen estado. El término que generalmente se suele utilizar para designar los movimientos de material en las laderas y taludes es el de deslizamiento (todos aquellos fallos del terreno, en los que una masa del mismo es desplazada desde un punto superior de la pendiente hasta un punto inferior).

Los cuatro valores numéricos asignados para cada nivel de riesgo en base a la evaluación realizada son: 3 puntos para un peligro bajo, 9 puntos para un peligro mediano, 27 puntos para un peligro alto y 81 puntos para un peligro muy alto. El Índice General de Estabilidad de Terraplenes Carreteros (IGE_{TC}) es un valor representativo de la sumatoria de las puntuaciones dadas a cada uno de los factores (3, 9, 27 y 81) que caracterizan a la falla y/o problema que se genera en la estructura de la vía. El desarrollo de la Metodología de Evaluación brindará a los departamentos de conservación y mantenimiento la información necesaria para clasificar de los terraplenes inestables o próximos a estarlos de acuerdo al nivel de riesgo que presenten. Este nivel de riesgo se obtendrá mediante el Índice General de Estabilidad de Terraplenes Carreteros (IGE_{TC}). La evaluación de los taludes de terraplenes y el riesgo que presenta, está basado en la observación directa del sitio y las características de cada factor. La validez de la metodología propuesta se comprueba a través del uso de técnicas de análisis multivariante, incluyendo el método Kormogorov-Smirnov (K-S), Análisis de varianzas (ANOVA) y la prueba t-test.

Abstract

Man's need to estimate the risk and reliability of the embankments has led to the development of different methods, procedures and techniques that help you to have greater certainty of the possible causes, consequences and effects which the structure would fail earthy.

Speaking of management we refer to the efficient management of resources to maintain the embankments in good condition. The term generally is often used to describe the movement of material on the slopes and glide slope is (all those failures of the land, in which a mass of it is displaced from a top of the slope to a point below).

The four numerical values assigned to each risk level based on the evaluation criteria: 3 points for a low risk, 9 points for a medium risk, 27 points for a high risk and 81 points to a very high hazard.

The General Index Roadway Embankments Stability (IRSER) is a value representing the sum of the scores given to each of the factors (3, 9, 27 and 81) that characterize the failure and / or problem that is generated in earthy structure.

The development of evaluation methodology will allow the maintenance departments of conservation and classification of unstable embankments or near to be according to the level of risk posed. This risk level will be achieved by General Stability Index Roadway Embankments (IRSER). The evaluation of the slopes of embankments and the risk presented is based on direct observation of the site and the characteristics presented by each factor.

The validity of the proposed methodology is tested through the use of multivariate analysis techniques, including the method Kormogorov-Smirnov (K-S), Analysis of variance (ANOVA) and t-test.

Resumen ejecutivo

Los medios de comunicación: terrestre, marítimo, aéreo, telecomunicaciones, constituyen una característica propia de la sociedad. Su desarrollo ha sido paralelo al rápido cambio social y económico, la innovación tecnológica y la desaparición de algunas formas tradicionales de control por otras más recientes.

En el ámbito de la Ingeniería de Vías Terrestres, este aspecto permanece en permanente investigación sobre nuevos métodos, los cuales permitan optimizar los medios de comunicación tanto en la construcción de nuevas vías, como caminos y puentes, así como mantenimiento, conservación y evaluación de los ya existentes.

Diversas instituciones de carácter internacional como el Departamento de Transporte de Oregon (ODOT, por sus siglas en inglés), Departamento de Transporte de Ohio (ODOT), Departamento de Transporte del Estado de Washington (WSDOT), Departamento de Transporte de Tennessee (TDOT), Departamento de Transporte y Servicios Públicos de Alaska (DOT&PF), entre otros, han aportado valiosa información a la Ingeniería de carreteras. Específicamente en la evaluación de tramos, donde han establecido parámetros para evaluar el grado de riesgo que presentan los taludes de terraplén en las vías ya existentes.

El objetivo de este trabajo es establecer una metodología que permita evaluar el nivel de riesgo en los taludes de terraplenes mediante un Índice General de Estabilidad de Terraplenes Carreteros (IGE_{TC}) tomando como muestra el tramo carretero Maravatío-Zapotlanejo, ubicado en los estados de Michoacán y Jalisco, mediante la observación directa de los factores geográficos, orográficos, geotécnicos, geológicos, hidrológicos y todos aquellos considerados de relevancia, así como en las aportaciones teóricas de las diversas instituciones que realizan estudios en esta área del conocimiento.

Cinco apartados integran el capitulado. En el primero se señala la importancia en la gestión de terraplenes, la necesidad de disminuir los riesgos y los factores que provocan deslizamientos en los tramos carreteros. La metodología para la evaluación de la estabilidad de terraplenes se define en el capítulo dos. En el tercero se establecen los factores y método para la evaluación del riesgo así como las categorías consideradas en este documento. En el penúltimo capítulo se abordan generalidades, el desarrollo de la matriz para la evaluación del riesgo, la validación estadística y la evaluación del tramo carretero Maravatío-Zapotlanejo. Finalmente, para el capítulo cinco se tienen las conclusiones y recomendaciones para la gestión de estabilidad de terraplenes carreteros.

1 Introducción

Los medios de comunicación terrestre, marítimo, aéreo, telecomunicaciones, etc. constituyen una característica propia de la sociedad moderna. Su desarrollo ha sido paralelo al rápido cambio social, la innovación tecnológica y la desaparición de algunas formas tradicionales de control por otras más recientes.

En el ámbito de la comunicación terrestre es una constante la permanente investigación sobre nuevos métodos para eficientar los medios de comunicación tanto en la construcción de nuevas vías como caminos y puentes, así como mantenimiento, conservación y evaluación de los ya existentes.

Diversas instituciones internacionales como Oregon Department of Transportation, Ohio Department of Transportation, Washington Department of Transportation, Tennessee Department of Transportation, Alaska Department of Transportation, etc. han aportado valiosa información a la Ingeniería en vías terrestres. Específicamente en la evaluación de tramos carreteros han establecido parámetros para evaluar el grado de riesgo que presentan los taludes de terraplén en las vías ya existentes.

El objetivo de este trabajo es establecer una metodología que permita evaluar el nivel de riesgo en los taludes de terraplenes mediante un Índice General de Estabilidad de Terraplenes Carreteros (IGE_{TC}) tomando como muestra el tramo carretero Maravatio-Zapotlanejo ubicado en los estados de Michoacán y Jalisco, mediante la observación directa de los factores geográficos, orográficos, geotécnicos, etc. que presenten así como en las aportaciones teóricas de las diversas instituciones que realizan estudios en esta área del conocimiento.

Cinco apartados integran el capitulado. En el primero se señala la importancia en la gestión de terraplenes, la necesidad de disminuir los riesgos y los factores que provocan deslizamientos en los tramos carreteros. La metodología para la evaluación de la estabilidad de terraplenes se define en el capítulo dos. En el tercero se establecen los factores y método para la evaluación del riesgo así como las categorías consideradas en esta metodología. En el penúltimo capítulo se aborda generalidades, el desarrollo de la matriz para la evaluación del riesgo, la validación estadística y la evaluación del tramo carretero Maravatio-Zapotlanejo. En el capítulo cinco se establecen las conclusiones y recomendaciones para la gestión de estabilidad de terraplenes carreteros.

El alcance y la dimensión de los logros de este proyecto son modestos pero la intención básicamente es la de aportar conocimiento en beneficio de la sociedad, específicamente contribuir a la seguridad de la población que transita en los tramos carreteros.

Es importante señalar el apoyo y asesoría que recibí del Dr. Paul Garnica Anguas, Coordinador de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte para realizar esta investigación. Quizá las expectativas no fueron cubiertas en su totalidad pero fue una experiencia personal muy valiosa.

2 IMPORTANCIA DE LA GESTIÓN DE TERRAPLENES

La necesidad del hombre por estimar el riesgo y la confiabilidad de los terraplenes, ha propiciado el desarrollo de distintos métodos, procedimientos y técnicas que le ayudan a tener una mayor certidumbre de las posibles causas, consecuencias y efectos que implicaría el que un terraplén fallase.

Debemos tener presente en primer lugar el significado de activo, el cual consiste en: “el conjunto de bienes tangibles o intangibles que se poseen. Se considera activo aquellos bienes que tienen una alta probabilidad de generar un beneficio económico a futuro y se puede gozar de los beneficios económicos que el bien otorgue. Los activos son un recurso o bien económico, con el cual se obtienen beneficios”.

Al hablar de gestión nos referimos a la administración eficiente de los recursos necesarios para mantener los terraplenes en buen estado. La sujeción de un tope presupuestario contra la optimización eficiente de la infraestructura vial, hacen necesaria la adaptación de técnicas modernas de gestión que involucren la recopilación eficiente de información en los terraplenes carreteros a considerar, tomando en cuenta la influencia que tienen los terraplenes individuales en el funcionamiento total de la red carretera.

Un riesgo es la combinación de la probabilidad de que un evento peligroso ocurra y el efecto de sus consecuencias. Así mismo, la evaluación del riesgo se refiere, al proceso para estimar la magnitud de un riesgo y decidir si es o no aceptable.

Con esto, podemos decir que la gestión del riesgo mediante los activos geotécnicos consiste en poder reducir los problemas de inestabilidad a un nivel tolerable, gestionar todo el ciclo de vida de los activos físicos con el fin de maximizar su efectividad; asegurando prevenirlos, controlarlos y monitorearlos según las condiciones observadas para así mejorar su rendimiento, reducir sus costos y extender la vida útil del terraplén.

2.1 Salidas y resultados

En relación a la gestión de activos, dos aspectos son considerados importantes:

1. Desempeño de los activos mismos.
2. Desempeño de las personas que intervienen en el sistema de gestión de activos.

Es de vital importancia realizar una distinción entre salidas y resultados, en el contexto de gestión de desempeño:

- Las salidas guardan relación con el esfuerzo-costos o recursos (por ejemplo: el número de horas-hombre utilizadas en inspecciones de terraplenes o los kilómetros de terraplenes reparados).
- Los resultados se refieren a las mejoras obtenidas en el desempeño (por ejemplo, la mejora será evidenciada en la buena condición de la vía y reducción en los porcentajes de taludes de terraplenes en riesgo o reducción en el número de fallas de taludes de terraplenes).

Las medidas de salida proporcionan una indicación tangible de logro para el mantenimiento preventivo; las cuales:

- Pueden ser más fácilmente comprensible para un público no técnico.
- Suelen ser más fáciles y menos costosos de medir que los resultados y por lo tanto puede proporcionar resultados provisionales en el desempeño.
- Proporcionan una indicación inmediata de la realización de aquellas actividades que benefician a largo plazo (es decir, donde los resultados no son inmediatamente evidentes). Los resultados todavía deben ser controlados a largo plazo, y se deben complementar con la información de las indicaciones a corto plazo de lo que se haya trabajado.

Los resultados se refieren a las mejoras en el desempeño de las actividades ya ejecutadas.

Los indicadores de desempeño más adecuados para la gestión de activos geotécnicos en los terraplenes de acuerdo a la Permanent International Association of Road Congresses (PIARC) están basados en lo siguiente:

A. Basado en las Salidas:

De acuerdo al Activo:

- Condición que presenta el talud del terraplén (número o kilómetros de taludes en mal estado).
- Categoría en que se encuentra el riesgo que presenta el talud del terraplén (número o kilómetros de taludes de alto riesgo).
- Trabajo de corrección o mantenimiento para los taludes de terraplenes (kilómetros que requieren atención).

De acuerdo al Administrador del Activo:

- Progreso del inventario de taludes de terraplén (km de taludes con datos de inventario sobre su altura, el ángulo de inclinación, principio/fin del terraplén, etc.).
- Progreso en la evaluación de taludes de terraplén (km de taludes inspeccionados y evaluados para tener una renovación de datos para próximas evaluaciones).
- Progreso de trabajos para la atención de taludes de terraplén en mal estado o con presencia de alguna falla (km reparados).
- Costos de los trabajos en el arreglo de los taludes de terraplén (costos de mantenimiento).

B. Basado en los Resultados:

- Fallas en los taludes (por año).
- Daños ocasionados por las fallas de los taludes de terraplén (número por año).
- Retrasos en las redes carreteras debido a las fallas (retraso vehículo-hora).
- Accesibilidad de la vía (tiempo que un carril se mantiene cerrado por las fallas)

Por lo tanto, la gestión del riesgo mediante activos geotécnicos en terraplenes carreteros en épocas actuales se ha hecho necesaria, asimismo el desarrollo y avances en las técnicas analíticas que han permitido llevar a cabo la evaluación del riesgo de manera más intensa.

2.2 Necesidades de disminuir el riesgo.

En nuestros días el gran volumen de construcción carretera hace necesario alterar constantemente la superficie natural del terreno, siendo unidades de obra muy comunes la excavación de desmontes, así como la construcción de terraplenes, superficies creadas en forma artificial. Los factores antrópicos como la inestabilidad intrínseca de los terraplenes debida a los esfuerzos producidos por el suelo, los malos o nulos hábitos de mantenimiento y conservación, las sobrecargas producidas por los vehículos debido a un incremento del Tránsito Promedio Diario Anual (TDPA) en relación con el cual fue diseñada la carretera, así como todos los factores naturales (agua, terremotos, nieve, etc.), que generan un peligro latente para la vía carretera tanto como principalmente a los usuarios.

La decisión sobre la necesidad de información sobre los problemas de inestabilidad es el primer paso para asegurar que el riesgo de inestabilidad no exceda un grado aceptable para la planificación del uso futuro del terraplén.

El objetivo de la información sobre deslizamientos es identificar las áreas relativamente susceptibles a deslizamientos. No entender los efectos potenciales que los deslizamientos pueden tener sobre un terraplén, o cómo el terraplén podría afectar el potencial de deslizamientos, conduce a un mayor riesgo.

Los cambios naturales así como aquellos inducidos por el hombre pueden afectar la susceptibilidad a deslizamientos y se deben comprender al evaluar el riesgo de inestabilidad del terraplén.

Dado a los riesgos que corren los usuarios así como las pérdidas económicas de las empresas encargadas del mantenimiento, se inicia la búsqueda de un método sistemático y lógico capaz de lograr que los niveles de riesgo de los terraplenes se mantengan en los valores más convenientes para ayudar a prevenir catástrofes para los usuarios así como para determinar los costos eficientes de reparación en un tiempo adecuado.

2.3 Deslizamientos.

Los deslizamientos de taludes provocan en el mundo importantes daños tanto materiales como de pérdida de vidas humanas. Para poder realizar una protección eficaz frente a estos desastres es necesario tener un completo conocimiento de las causas que los producen y poder realizar una predicción de las consecuencias que desencadenan.

El término deslizamiento abarca una gran cantidad de fenómenos, desde lentos deslizamientos superficiales, hasta los flujos catastróficos que pueden alcanzar velocidades de hasta 60 km/h.

Entre las causas principales que provocan este tipo de fenómenos se encuentran los cambios en las propiedades del suelo y de las rocas, los cambios en las tensiones efectivas debidos a variaciones de la presión intersticial, la influencia de los fenómenos climáticos como terremotos y precipitaciones, y las cargas y cambios en la geometría debidos a la acción humana.

2.3.1 Aspectos generales de los deslizamientos

El término que generalmente se suele utilizar para designar los movimientos de material en las laderas y taludes es el de deslizamiento. Desde un punto de vista general se puede definir un deslizamiento como todo desplazamiento de una masa de terreno que se moviliza por efecto de las fuerzas gravitatorias. Los materiales movilizados pueden ser rocas, derrubios, suelos o combinaciones de los mismos.

El movimiento estará influido tanto por el material como por otros factores (agua, hielo, acción humana, etc.) que rompen el equilibrio, desencadenando el movimiento del terreno, al provocar un predominio de las fuerzas gravitacionales sobre las resistentes del terreno.

Los deslizamientos pueden ser estacionales, produciéndose únicamente en ciertas estaciones o en un período de tiempo, o bien pueden aparecer inesperadamente, en este caso se puede decir que el movimiento ha permanecido latente durante cierto tiempo hasta que se ha desencadenado. Estos últimos son los que dan lugar a las grandes catástrofes.

La velocidad también puede variar: pueden ser muy lentos, incluso imperceptibles durante años provocando únicamente daños graduales, o muy rápidos ocasionando desastres naturales y humanos, destrozando propiedades y causando muertes inesperadamente.

Dos factores que presentan una gran influencia en el desencadenamiento de un deslizamiento son la inclinación de la pendiente y la estabilidad de la misma. Por otro lado, la aparición repentina o lenta de grietas, ondulaciones, etc. en el terreno son signos precursores que aumentan la probabilidad de la aparición de un deslizamiento en la zona. Los fenómenos de origen geológico o hidrometeorológico pueden desencadenar o intensificar los efectos de un deslizamiento.

Las consecuencias de los deslizamientos se pueden observar desde dos puntos de vista. Por un lado se pueden producir daños limitados a zonas geográficas determinadas, como es el caso de deslizamientos de laderas, y por otro lado, el desplazamiento puede afectar a áreas extensas, es por ejemplo el caso de derrumbes de origen volcánico, avalanchas, flujos y extensiones laterales. El que la zona afectada sea mayor o menor dependerá de la naturaleza específica del movimiento y de sus orígenes.

Independientemente del área afectada, estos movimientos suelen producir:

- Daños y destrozos en carreteras, vías férreas, oleoductos, líneas eléctricas y telefónicas, canales, sistemas de drenaje, puentes, presas.
- Pérdidas económicas y, lo que es más importante, de vidas humanas.

La magnitud del impacto de un deslizamiento dependerá principalmente del volumen de la masa en movimiento y de la velocidad de la misma, pero a la vez de la zona inestable y de la disgregación de la masa en movimiento.

Para poder reducir el impacto que producen estos movimientos es conveniente tener en cuenta ciertas consideraciones:

1. Los deslizamientos están generalmente asociados con períodos de fuertes lluvias o a la época del deshielo y tienden a empeorar sus efectos cuando se producen inundaciones.
2. Las áreas susceptibles de que se produzcan deslizamientos son aquellas en las que se han producido deslizamientos anteriormente, bases de

pendientes inclinadas, bases de canales de drenaje, y colinas donde se usen sistemas sépticos.

3. Las áreas seguras serán aquellas en las que no se hayan producido deslizamientos en el pasado, y aquellas relativamente planas sin cambios repentinos de pendiente.

4. El riesgo de fallo es mayor donde el terreno esté compuesto por rocas altamente fracturadas o donde haya suelos superficiales, arcillas o sedimentos propensos a una licuación.

Por tanto, **la primera acción para evitar la catástrofe es evitar la zona de peligro**; sin embargo, en la mayor parte de los casos, se encuentran poblaciones o infraestructuras situadas en áreas de riesgo, y por tanto, es necesario encontrar soluciones que disminuyan los efectos del deslizamiento e incluso intentar evitar que este movimiento se desencadene.

2.3.2 Factores que influyen en los deslizamientos

2.3.2.1 Criterios de clasificación de los factores

Existen una gran cantidad de factores que, tanto aislados, como actuando conjuntamente pueden favorecer la aparición de un deslizamiento con el posible impacto que éste puede producir. La probabilidad de que se desencadene un deslizamiento será mayor cuanto mayor número de factores actúen simultáneamente.

A continuación se muestra una gráfica de la evolución del factor de seguridad con el tiempo (Figura 2.1), y de cómo varía éste al actuar sobre el entorno diversos factores (M.E. Popescu, 2000).

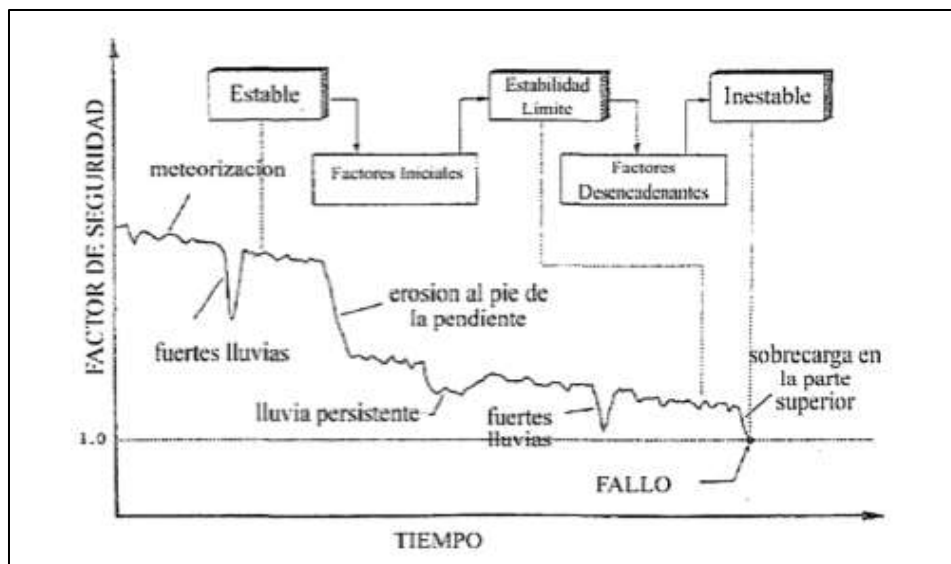


Figura 2.1 Ejemplo de cambios en el valor del factor de seguridad en el tiempo. (Shyamal, 2009).

Sin embargo no es sólo la combinación de los factores lo que desencadena el movimiento, sino que unos factores influyen en otros y ambos conjuntamente constituyen una causa desencadenante; por ejemplo, el tipo de material del que está constituido un terreno conjuntamente con la pendiente del mismo, forman la combinación perfecta para que se produzca un deslizamiento.

La clasificación de los factores que influyen en estos fenómenos se puede realizar atendiendo a diversos criterios:

A. Según su influencia en el equilibrio debido a la relación entre la fuerza de la gravedad y la fuerza resistente. Estos factores actúan rompiendo dicho equilibrio desde dos puntos de vista:

1. Aumentando la fuerza de la gravedad al aumentar el peso de la masa propensa a deslizar, por ejemplo, la lluvia, nieve, granizo y la acumulación de derrubios volcánicos, o la actividad humana en la acumulación de materiales en la superficie del talud, fugas de agua de tuberías, alcantarillas, etc.
2. Disminuyendo la resistencia del terreno de diversos modos:
 - Disminuyendo o eliminando el soporte lateral, efecto que realizan factores como el poder erosivo de la lluvia, las corrientes o por la actividad humana tal como la construcción de obras lineales, la eliminación de muros de contención o la disminución del nivel en los embalses.
 - Vibraciones en el terreno producidas por terremotos y explosiones, maquinaria y tráfico en la carretera. Disminución del soporte del subsuelo debido a la disolución de materiales granulares y solubles (actividad kárstica), pérdida de resistencia o colapso del material.
 - Aumento de la presión lateral en grietas y cavernas debido a la congelación del agua en las mismas, hidratación de minerales y movilización de tensiones residuales.

B. Según el tiempo de influencia:

1. Permanentes: Aquellos, tales como las características del terreno, que permanecen sin cambio o que varían muy poco desde el punto de vista de la perspectiva humana, como pueden ser la geología y la topografía.
2. Variables: Aquellos, relacionados con las características del entorno, que cambian rápidamente como resultado de alguna variación en dicho entorno como, por ejemplo, vibración del suelo debida a terremotos, rápida elevación del nivel de las aguas subterráneas, mayor cantidad en la humedad del suelo debido a intensas precipitaciones, etc.

C. Según su campo de acción:

1. Geometría: aquellos que cambian la geometría del terreno, por ejemplo: erosión hídrica o eólica, acción humana, etc.
2. Material: aquellos factores que afectan al material debilitándolo, por ejemplo: erosión interior, daño, meteorización, etc.
3. Tensiones: se dividen en aquellos que afectan a las tensiones totales, tales como las fuerzas externas debidas a la acción humana, a los terremotos y a la lluvia; y aquellos que afectan a las presiones intersticiales provocando el aumento de las mismas como es el caso de las precipitaciones y los terremotos.

A continuación se da una descripción de los factores más importantes que influyen en que se desencadene un deslizamiento.

2.3.2.2 Factores naturales

Dentro de los factores naturales se incluyen:

- El material.

El tipo de material está estrechamente relacionado con el tipo de inestabilidad que puede producirse. Los terrenos en los que se desarrollan los deslizamientos se pueden dividir en rocas, suelos y materiales de relleno.

Antes de desencadenarse un deslizamiento se da una movilización de los materiales de dos tipos:

1. Mecánica: que incluye la disgregación granular, la descamación y la fragmentación.
2. Química: fundamentalmente la meteorización salina y la acción bioquímica de los suelos.

El tipo de material, además de influir en la forma de la pendiente (como se verá más adelante), influye en el tipo de rotura. Un terreno se puede romper fundamentalmente de dos modos, según la forma de la superficie de rotura, ya sea circular o plana. En materiales homogéneos isótropos, es decir, con las mismas propiedades en todas las direcciones, la superficie de rotura suele ser circular (Figura 2.2).

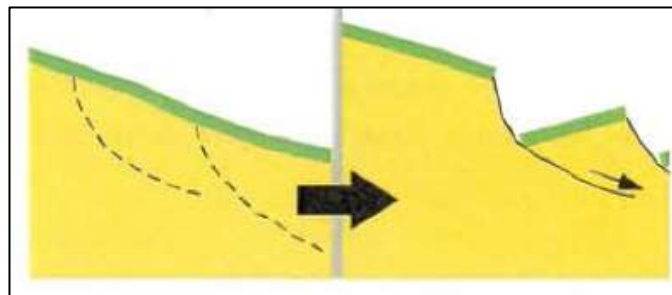


Figura 2.2 Rotura circular en materiales homogéneos isótropos.

Si el material presenta planos de debilidad, la rotura se produce en base a una superficie plana, desarrollándose el movimiento a lo largo de los planos de deslizamiento (Figura 2.3).

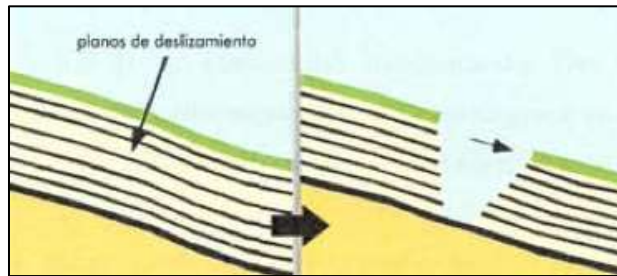


Figura 2.3 Rotura plana en materiales anisótropos.

- La pendiente.

Cuando más inclinada sea una pendiente mayor será la influencia de la gravedad y, por lo tanto, mayor será la probabilidad de que se desencadene un deslizamiento. La inclinación dependerá del tipo de material que la constituya y de la humedad del mismo.

- El agua.

El agua es el factor de origen natural que tiene mayor incidencia como factor condicionante y desencadenante de los deslizamientos. Se puede presentar de diversas maneras: corrientes en ríos contiguas a la vía, corrientes subterráneas, lluvia, nieve, etc.

Cuando el agua cae sobre un terreno disminuye la estabilidad de la pendiente, ya que aumenta temporalmente la presión intersticial, lo que reduce la resistencia al corte del material influyendo en el estado tensional del mismo, además de lubricarse las zonas de suelos o rocas débiles. Este efecto tiene más influencia en suelos coluviales ya que son relativamente permeables. La roca firme, sin embargo, tiene una baja permeabilidad con lo cual, este efecto no suele ser, por sí sólo, desencadenante de un deslizamiento. Por otro lado, el agua realiza un efecto de carga, ya que al añadirse al terreno aumenta la fuerza gravitatoria. Esto suele suceder cuando el terreno presenta muchas fracturas o es muy poroso.

Es importante también destacar el efecto erosivo del agua, ya que la interacción del agua con la superficie del terreno puede provocar dos tipos de debilitamiento: un debilitamiento químico que lentamente reduce el ángulo de rozamiento del material reduciendo su resistencia al corte, y un debilitamiento físico debido a la pérdida de material por la erosión.

Si esta erosión afecta al pie del talud produce desplazamientos de material y socavaciones, ya que disminuye la resistencia del pie del talud produciéndose además una falta de apoyo para los materiales, lo que conlleva a unos cambios en las condiciones de equilibrio y a la redistribución de tensiones provocando acarreo del material en el talud.

Los efectos producidos por la acción hielo - deshielo del agua del terreno producen una disgregación mecánica de la estructura del terreno que lleva a una reducción de las propiedades resistentes del material. La nieve por su parte, puede producir sobrecargas y aumentar el contenido de agua en el terreno.

- La actividad sísmica.

Los terremotos están causados por la súbita liberación de energía que se acumula lentamente a lo largo de una falla dentro de la corteza terrestre generándose una serie de vibraciones que se propagan como ondas de diferentes frecuencias cuya aceleración origina fluctuaciones en el estado de esfuerzos en el interior del suelo afectando al equilibrio.

Debido a que se pueden desencadenar deslizamientos en suelos con todo tipo de pendientes, tanto pronunciadas como prácticamente planas, en suelos formados por materiales resistentes, en suelos de relleno y de acumulación de residuos de minas; así como en condiciones de humedad del suelo tanto secas o muy húmedas. También se puede producir la licuación del suelo en determinadas áreas.

De hecho, en las regiones sísmicamente activas, los terremotos son la causa predominante de los movimientos de suelos en laderas y taludes.

- La actividad biológica.

Sin ser un factor determinante en el equilibrio del terreno del terraplén, condiciona la acción de otros factores más importantes. Dentro de la actividad biológica destaca la acción de la vegetación: la cubierta vegetal ayuda a mantener la estabilidad del terreno a través de las raíces, además contribuye al drenaje y atenúa la degradación superficial; sin embargo, algunas raíces tienen efecto disgregador del terreno disminuyendo la resistencia del mismo.

2.3.2.3 Factores debidos a la actividad humana.

La actividad humana, derivada de la obra civil, puede inducir, acelerar o retardar los deslizamientos. Hay factores tales como la humedad y la pendiente de los suelos que pueden ser fácilmente alterados. Un aumento de humedad en los suelos o un cambio de forma en la pendiente se pueden dar debido a actividades de desarrollo tales como los desmontes para nuevos terraplenes, la deforestación o supresión de vegetación en el talud, excavaciones colindantes al pie del talud, la irrigación, las sobrecargas ejercidas en el terraplén, etc.

2.3.3 Signos de movimiento del talud.

1. Grietas debido a tensión sobre los caminos o sobre el terraplén debajo del camino.

El suelo es muy débil debido a la tensión y solo se necesita un ligero movimiento en la cima de la ladera antes de que el suelo falle y se forme la grieta. Las grietas de tensión en la carpeta indican que el movimiento ha iniciado. Estas grietas permiten que el agua se introduzca hacia el material blando a lo largo del plano de falla, de esta forma se le agrega la presión del agua al movimiento de la masa. Las grietas de tensión sobre la carpeta indican que la ladera natural o el corte está en su etapa inicial del movimiento (Figura 2.4).

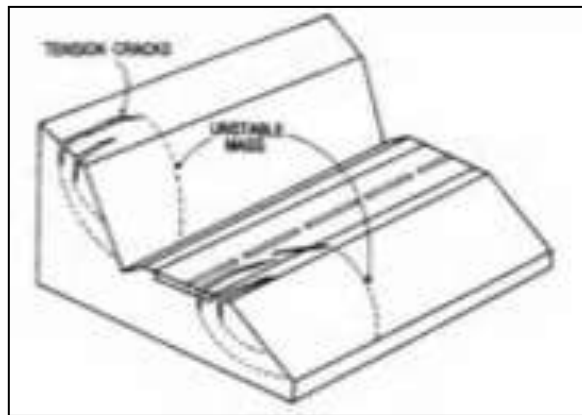


Figura 2.4 Grietas sobre la carretera o en el talud (Liang, 2007)

2. Pendientes sobre o debajo de la carpeta.

Las pendientes indican que la masa de suelo ya ha fallado y se ha movido. Algunos deslizamientos de tierra podrían tener más de una pendiente, así como las masas de suelo tienen la tendencia a moverse en bloques (Figura 2.5).

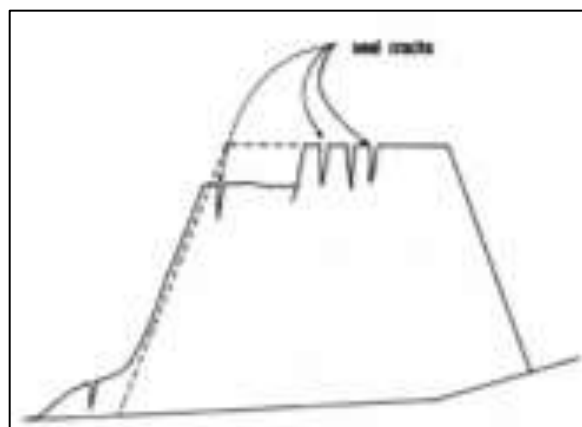


Figura 2.5 Cambios de pendiente en la calzada (Liang, 2007).

3. Guarniciones (barandillas) hundidas.

Las barandillas (guarniciones) son un elemento protector en las carreteras, pero también pueden servir como indicador de movimientos. Cuando en la superficie de rodamiento no se presenten cambios visibles, el observar el estado de las guarniciones suele ser de gran ayuda (Figura 2.6). Una guarnición oblicua, inclinada o con buzamiento, indicará problemas con el terraplén. Al existir problemas en el terraplén se deberá observar si existe continuidad con algún corte, puesto que las deformaciones pudieran ser producto del empuje de la masa de tierra ocasionado por un deslizamiento rotacional. Un escurrimiento de material por debajo del pie del talud de corte puede modificar la estructura de las guarniciones.

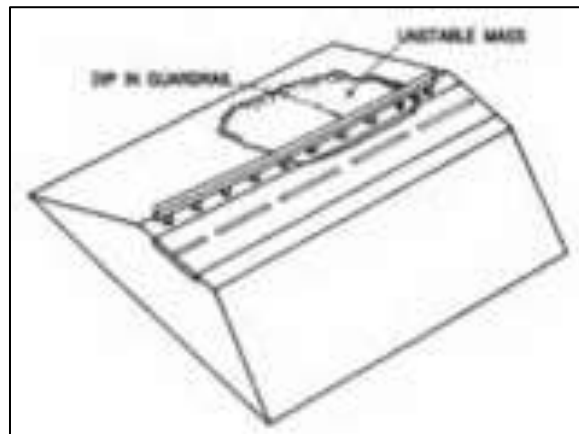


Figura 2.6 Hundimiento de las guarniciones (Liang, 2007).

4. Grado de inclinación.

Para terraplenes largos y altos, el grado de inclinación envuelve todos los carriles. Este tipo de movimiento puede estar asociado con asentamientos o deslizamientos del terraplén debido a su propio peso (Figura 2.7). El grado de inclinación también puede estar asociado con las alcantarillas ubicadas en grandes rellenos. En muchos casos, estas pendientes pueden estar atribuidas a los asentamientos del suelo alrededor de la alcantarilla y no relacionarlo con el asentamiento o deslizamiento que pueda presentar en general.

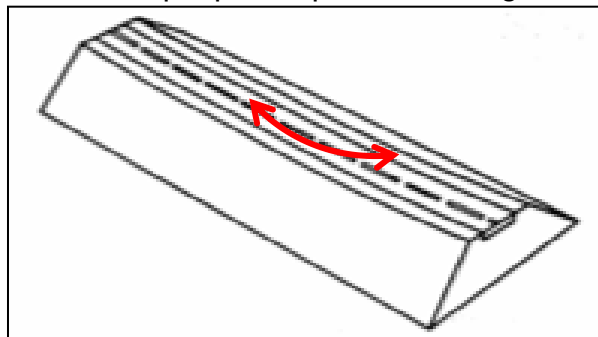


Figura 2.7 Grado de inclinación (Liang, 2007)

5. Abombamiento en el talud.

La mayoría de los deslizamientos presentan abombamientos en el pie del talud debido a la acumulación del material. Este abultamiento indica que un movimiento considerable de suelo ya ha ocurrido y que el movimiento continuará probablemente hasta que se produzca la falla total (Figura 2.8).

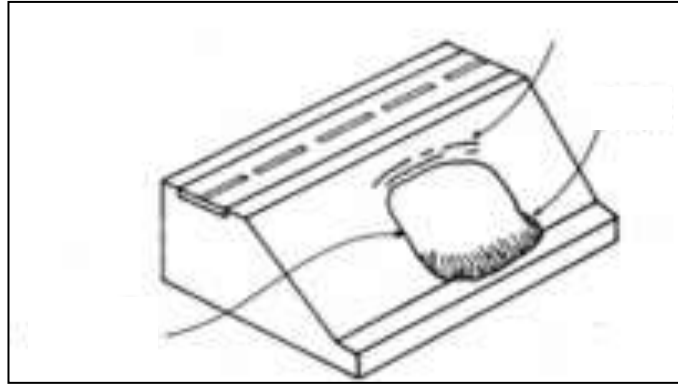


Figura 2.8 Abombamiento en el talud (Liang, 2007).

6. Deficiencias en el drenaje superficial.

- Alcantarillas bloqueadas. Una alcantarilla bloqueada no permite que el agua fluya correctamente, lo cual a su vez puede causar estancamiento de agua cerca del pie del talud. Esta condición tiende a saturar el pie del talud, causando que el terreno pierda fuerza e impidiendo su habilidad para resistir su propio peso. La presencia de esta deficiencia podría generar un derrumbe.
- Cunetas de concreto que presentan daños. Las cunetas que presentan resquebrajaduras permiten que el agua superficial fluya hacia abajo. Esto puede erosionar el talud o permitir que el agua en la superficie, sature porciones del mismo.
- Agua estancada. El agua estancada puede ocasionar problemas de infiltración y saturar el terraplén, lo que podría originar un deslizamiento.
- Obras de drenaje con descarga de agua sobre el talud. Las tuberías, alcantarillas, cunetas, bordillos que permitan que el agua escurra dentro del talud pueden ser causas importantes para un deslizamiento (Figura 2.9). El agua de estos elementos puede infiltrarse hasta aumentar las fuerzas que desequilibran el talud.

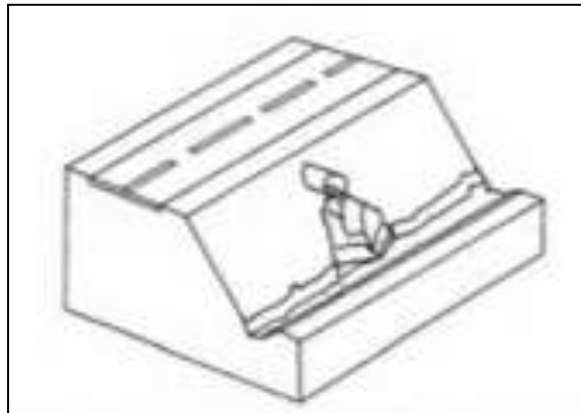


Figura 2.9 Descarga del agua sobre el talud (Liang, 2007).

7. Deficiencias en el drenaje por aguas subterráneas.

- Manantiales en o en la ladera del talud. Los manantiales indican la presencia del nivel freático interceptando la superficie del suelo. Los manantiales indican también que el agua proveniente de un acuífero satura una porción del terraplén o una sección del talud. Las áreas alrededor de los manantiales son particularmente vulnerables a los deslizamientos de tierra.
- Color en la cara del talud. Los colores diferentes pueden indicar diferencias bien definidas en la cantidad de agua presente (Figura 2.10). Un color más oscuro será indicador de mayor cantidad de agua presente. El área que contiene mayor cantidad de agua es más sensible a los derrumbes.

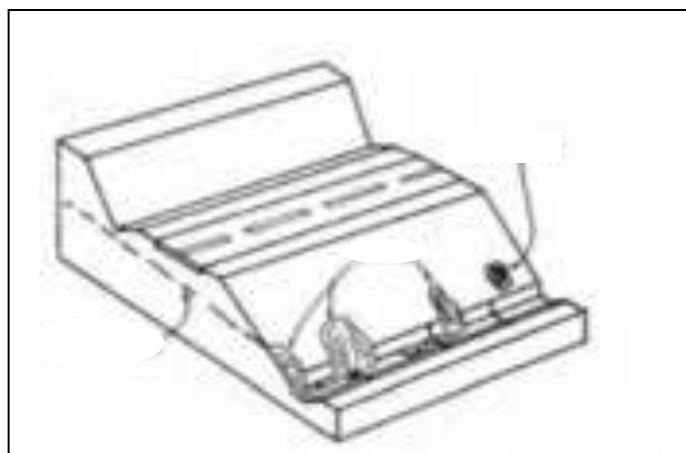


Figura 2.10 Color en la cara del talud (Liang, 2007)

- Vegetación. El tipo y condición de la vegetación creciendo en los taludes puede indicar la presencia de agua subterránea. Las aneas y los sauces son plantas que indican la presencia de agua subterránea. Las áreas cubiertas de vegetación verde en la temporada de secas, son algunas veces indicadores de agua subterránea o superficial (Figura 2.11).

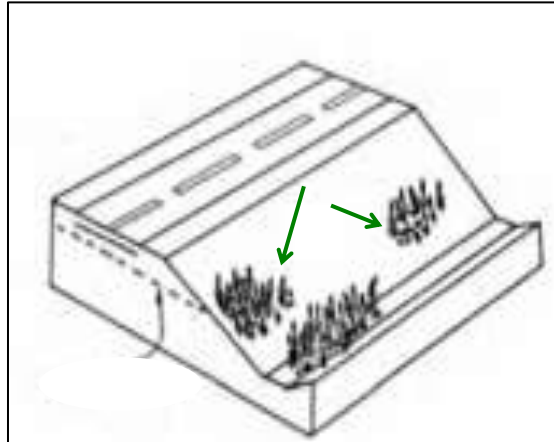


Figura 2.11 Vegetación en el talud (Liang, 2007).

8. Erosión.

- En el pie del talud. El agua superficial de las cunetas u otras estructuras de drenaje pueden erosionar el pie de talud, remover el soporte del suelo y causar un deslizamiento. La erosión puede ocurrir por la falta de limpieza de las cunetas, lo que ocasiona infiltración (Figura 2.12).

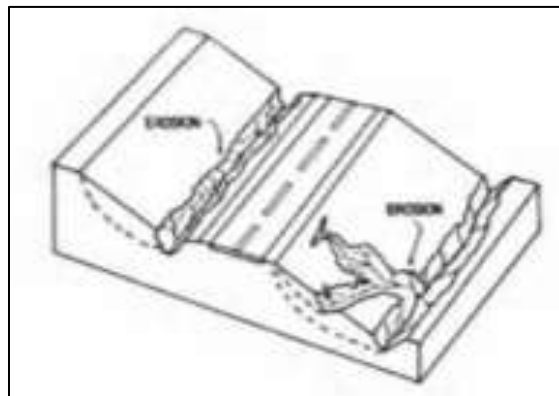


Figura 2.12 Erosión (Liang, 2007).

- En el cuerpo del talud. La falta de contracunetas en taludes muy grandes puede ocasionar mucha velocidad en el agua que escurre por el talud, erosionado su superficie.

9. Cambio de características.

La mayoría de los pequeños signos de movimientos de tierra pueden ser los árboles, cuando pierden la verticalidad. Inclinações en los árboles que se encuentran en la superficie de un talud y que ahora se encuentran creciendo verticales indican que un deslizamiento de tierra que ocurrió muchos años atrás.

Como sea, el movimiento a parado y ahora el árbol se encuentra creciendo sobre la vertical nuevamente. Un árbol creciendo sobre una ligera curva nos puede indicar un gradual y lento deslizamiento del talud. Postes de teléfono y luz que se han hundido e inclinado fuera de su alineamiento son también un buen indicador de movimientos de tierra (Figura 2.13).

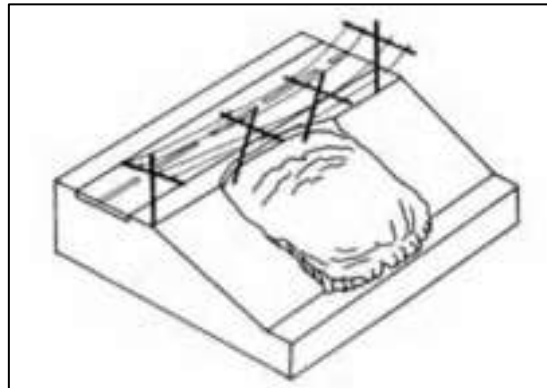


Figura 2.13 Signo de movimiento (Liang, 2007).

10. Cambios en las estructuras.

Las desnivelación entre la unión de las vigas de un puente con la carretera o los pilares que se mueven hacia el final de las vigas, son indicadores de que existe un movimiento del terraplén (Figura 2.14).

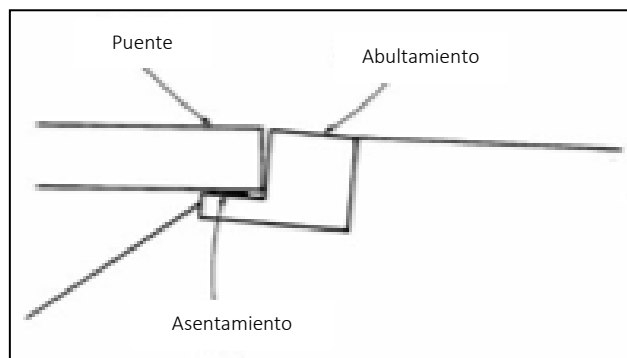


Figura 2.14 Cambios en las estructuras (Liang, 2007).

2.3.4 Tipos de deslizamientos.

Los deslizamientos son todos aquellos fallos del terreno, en los que una masa del mismo es desplazada desde un punto superior de la pendiente hasta un punto inferior.

2.3.4.1 Desprendimientos.

Puede ser de dos tipos dependiendo del material arrastrado: desprendimiento de partículas, si el material principal es grava, o bien, desprendimientos de arenas, en caso de que el material principal sea arena. Este material arrastrado está formado por depósitos no consolidados con poca humedad o secos.

Por ejemplo, las roturas de las riberas de los ríos son un efecto de este tipo de movimiento, la corriente erosiona la parte baja de los recodos del río lo que hace que la parte superior del recodo se desplome.

2.3.4.2 Deslizamientos.

Son movimientos que se producen al superarse la resistencia a cortante del material y tienen lugar a lo largo de una o varias superficies, o a través de una franja estrecha del material (banda de cortante). El comportamiento de la masa deslizante dependerá del tipo de material y de sus características. Generalmente, este material, ligeramente húmedo, se encuentra sin consolidar y con una gran proporción de arcillas, pudiendo romperse en innumerables fragmentos o permanecer como una masa intacta. La velocidad es variable teniendo una gran influencia la pendiente de la superficie de rotura sobre la que desliza el material.

Si la superficie de rotura es curva se suelen denominar hundimientos o derrumbes rotacionales. El giro, generalmente regresivo, de la masa se produce alrededor de un punto fijo, apareciendo grietas en la cresta del área inestable y abombamientos al pie de la masa deslizante. Normalmente consisten en un hundimiento superior y un flujo inferior (Figura 2.15).

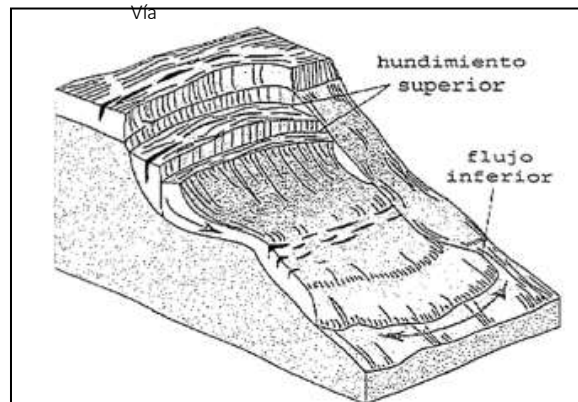


Figura 2.15 Esquema de un deslizamiento rotacional en talud. (Internet: www.google.com/imagenes)

Las superficies de rotura circular pueden originarse en tres partes diferentes del talud según las características resistentes del material, la altura, la inclinación del talud, etc. (Figura 2.16).

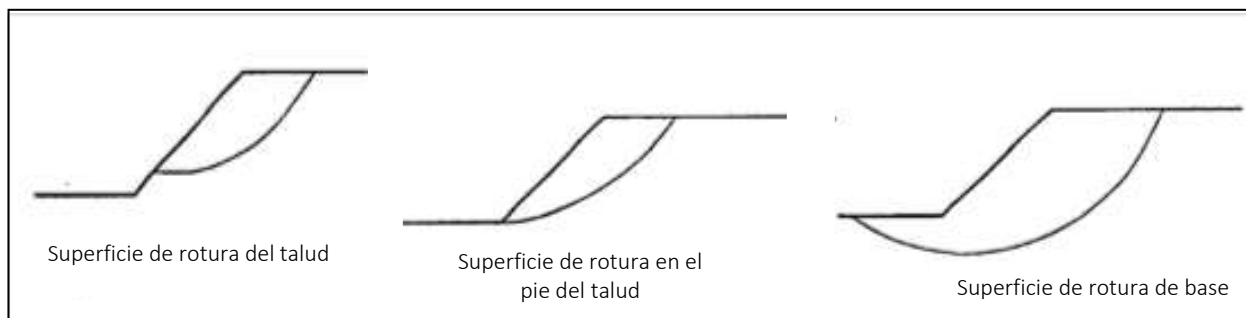


Figura 2.16 Superficie de rotura circular

Las principales causas para que se produzca este tipo de rotura son: el aumento en la inclinación del talud debido a la meteorización y a las fuerzas de filtración, o bien, debido a la erosión en la base de la pendiente.

Si la superficie de rotura es plana se suelen denominar deslizamientos planares, en ellos uno o más bloques de rocas o terrenos deslizan a lo largo de una superficie plana (Figura 2.17), que puede ser un plano del suelo, una falla o una superficie de fractura, con velocidades de lentas a rápidas. La trayectoria de caída, por tanto, es aproximadamente paralela a la superficie de rotura. Estos deslizamientos están controlados por discontinuidades influyendo la resistencia al corte entre los distintos estratos, los diferentes grados de meteorización, etc.



Figura 2.17 Esquema de un deslizamiento planar. (Internet: www.google.com/imagenes)

2.3.4.3 Flujos.

Se caracterizan por deformaciones tangenciales distribuidas en la masa del material no consolidado, y que presenta, generalmente, un alto contenido de agua y una distribución de velocidades que los hace asimilarse a fluidos viscosos.

Generalmente, los materiales son pequeños fragmentos de roca, arenas y limos, y tierras y lodos. Los flujos son, por tanto, movimientos rápidos en los que los suelos, rocas, y materia orgánica se combinan con aire y agua, formando un conjunto que se desplaza pendiente abajo. No suelen definir superficies de deslizamiento.

Alguna de las características de estos flujos que pudiera presentarse en un terraplén son:

- Solifluxión: consiste en un movimiento lento por gravedad sobre una ladera del suelo o por parte de las partículas del suelo que se desprenden por la erosión o las corrientes de agua en el talud como resultado de la congelación y deshielos alternativos del agua que contienen. Generalmente los fragmentos del suelo se sitúan y acumulan en el pie del talud.
- Flujos de tierra: Se presenta con velocidades lentas o rápidas. El primer caso se suele dar en pendientes de moderadas a grandes. El material suele estar saturado o con alto contenido de agua, siendo una mezcla de finos, suelo plástico o rocoso con matriz sedimentaria arcillosa. Este tipo de flujos suele comenzar por el deslizamiento de una capa poco profunda de suelo que resbala por él mismo, paralela a la pendiente. Cuando estos flujos se presentan a grandes velocidades suelen estar causados por la licuación del terreno, por terremotos y/o precipitaciones intensas.
- Reptación del suelo (creep): consiste en un movimiento lento y superficial asociado a la falta de resistencia por la baja presión de confinamiento del terraplén y que no afecta al sustrato. Suele originarse por la acción de fuerzas de filtración o gravitacionales. Los materiales movilizados no están consolidados, y se encuentran saturados en un porcentaje de hasta un 30% de agua. Su detección se produce mediante indicadores secundarios como son los árboles torcidos (Figura 2.18).

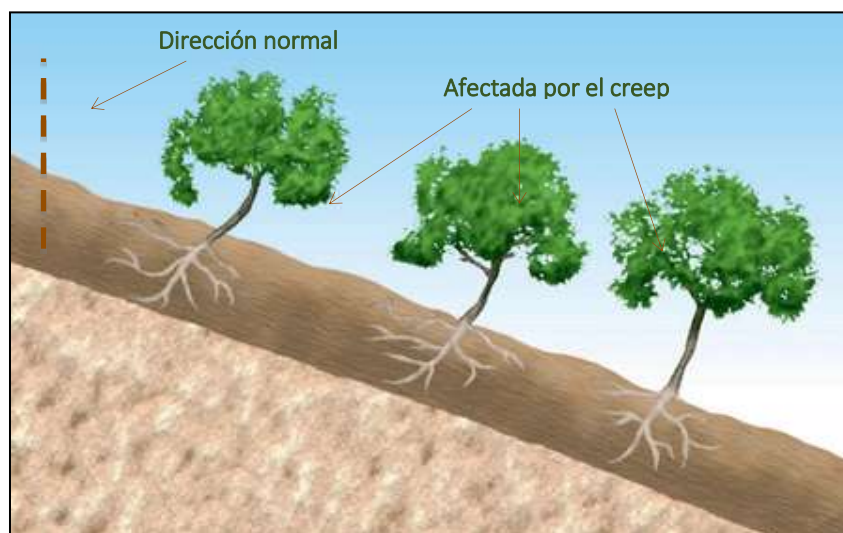


Figura 2.18 Forma de los troncos de los árboles en terrenos con reptación.

3 Metodología para la evaluación de estabilidad de terraplenes carreteros

3.1 INSPECCIÓN PREVIA DE CAMPO.

La inspección previa del campo se hace para conocer todo el entorno y las características que envuelven a cada terraplén por evaluar, esto con la finalidad de observar los puntos en donde exista un riesgo considerable; por ello, es necesario hacer un levantamiento previo del tramo carretero obteniendo datos específicos de cada terraplén, por ejemplo: altura, pendiente, longitud, el estado actual de los sistemas de drenaje, condiciones actuales de estabilidad y si presenta algún problema, que sistema de tratamiento tiene para su solución.

Es innecesario realizar la inspección de los terraplenes que mediante una observación rápida presenten condiciones estables, por lo que se le dará un mayor interés a los que presenten alguna característica (factor) de inestabilidad. La evaluación e información obtenida es mediante observaciones directas del terraplén a nivel de la carretera.

3.2 EVALUACIÓN PRELIMINAR.

Después de la inspección previa, se realiza una evaluación preliminar con el fin de validar los datos recabados, identificar los terraplenes que presentan una característica de inestabilidad y registrar minuciosamente todas las fallas y/o problemas encontrados en cada uno de ellos.

Al realizar la evaluación con los factores que caracterizan a cada falla y/o problema y que pudieran estar presentes, se les asigna una puntuación numérica que corresponde a el riesgo o importancia que generan en el terraplén, con un rango mínimo en aquel que presenta un riesgo bajo hasta un máximo para el que presenta un nivel de inestabilidad alto. Adoptando así, valores de tipos no métricos o cualitativos, los cuales para su validación se utiliza técnicas de análisis multivariante.

3.3 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.

1. Una de las características fundamentales de la evaluación es el investigador (evaluador) quien no solo analiza, sino es el medio de obtención de la información. Por lo que requiere para evaluar los terraplenes a un ingeniero especialista en las vías terrestres que mediante sus conocimientos profesionales pueda realizar una inspección detallada e identificar de una forma más sencilla los factores involucrados en la evaluación.
2. Aunado a los datos específicos del terraplén, se debe tener un registro de la información general de este, tal como:
 - El tramo carretero y en el kilómetro en donde está localizado, cuerpo al que pertenece, condición en el cual se encuentra (seco o mojado). Adicional a esto, se debe registrar la fecha del levantamiento (día-mes-año) y si la vía esta concesionada o a cargo del gobierno.
 - Los problemas que se presenten en las zonas aledañas que puedan o no llegar a afectar el terraplén que se está inspeccionando.
 - En caso de que las obras de drenaje o el pavimento estén dañados, se debe colocar la cantidad de grietas, la abertura, la longitud y la profundidad, de ser posible. También se debe especificar la dirección de la grieta (vertical, horizontal o diagonal).
 - Llevar un registro fotográfico de los problemas encontrados, para lo cual se debe registrar el número de la(s) fotografía(s) correspondiente(s) al problema reportado en cada uno de los factores evaluados del terraplén. También se debe mostrar una vista general de la estructura.
3. En la metodología no existen ensayos de laboratorio que indiquen y corroboren algún problema de compactación, capacidad de carga o calidad de los materiales, puesto que la evaluación se realiza en base a observaciones de factores causantes de inestabilidad. Por ende, debemos de considerar importante las fallas que se reflejan en la carpeta asfáltica, esto debido a los problemas estructurales que se originan en las capas inferiores, por ejemplo, una falta de capacidad de carga en el material utilizado como subrasante produce asentamientos desde la parte inferior hasta la parte superior del pavimento, reflejándose en una ondulación de la superficie de rodamiento.
En su momento, las obras inducidas (obras de drenaje) pueden afectar directamente la estabilidad del terraplén debido a la falla de una de ellas, por lo cual es necesario hacer una revisión detallada del estado de estas.
4. Se recomienda que la evaluación se realice dos veces al año, la primera en temporada de lluvias y la segunda inspección en temporada de secas, con el fin de que al presentarse la precipitación mayor, prevenir y corregir fallas que hayan surgido y/o existentes, para así evitar una inestabilidad alta.

Puesto que el propósito no es resolver el problema, si no brindar información necesaria para implementar una solución adecuada.

3.4 ESCALA DE MEDIDA.

Como referencia histórica y pionera de varias metodologías, desde 1976 Bieniawski publico el sistema para la clasificación de masas de roca (RMR, siglas en ingles) en la cual la asignación de la clasificación de las masas de roca era mediante el uso de diferentes parámetros que englobaban ciertas características propias de ésta y eran clasificadas en relación al riesgo que presentaban.

La puntuación numérica se basa en un sistema de escala exponencial (1,2,3,4) para identificar la gravedad de riesgo para cada factor. Estos valores se escalan mediante una función exponencial ($y=3^x$), con la finalidad de apreciar en una forma más clara, el nivel de inestabilidad que presenta. Por lo tanto, los cuatro valores numéricos asignados para cada nivel de riesgo son:

- 3 puntos para un peligro bajo.
- 9 puntos para un peligro mediano.
- 27 puntos para un peligro alto.
- 81 puntos para un peligro muy alto.

3.5 REGISTRO DE BASE DE DATOS.

El registro de datos se refiere al almacenamiento de las puntuaciones obtenidas en cada factor identificado en la evaluación de cada terraplén, anexando las fotos en donde se evidencia la severidad de todos ellos. Aunada a esto, se registra también los datos representativos que de alguna manera origina problemas de inestabilidad al pavimento cuando alguno de ellos presente un incremento brusco; dándole mayor importancia a los valores correspondientes al tramo en donde se encuentran los terraplenes que hayan presentado más incidencia de falla, estos son:

1. La precipitación pluvial de todo el tramo en estudio, registrándose los valores más bajos y más altos de cada mes del año.
2. El Tránsito Promedio Diario Anual (TDPA), anotando la tasa de crecimiento que presento.
3. Costos y periodos de mantenimiento anual, registrando las acciones que se hayan realizado para ello.

Con la base de datos de cada uno de los terraplenes, nos ayuda a tener un orden adecuado de los factores causantes de inestabilidad, así al presentarse un problema tendremos información adecuada que nos servirá como herramienta para desarrollar planes y estrategias de solución. Esta información se incrementara conforme pasen los años al ir guardando los datos de cada levantamiento que se realice.

3.6 ÍNDICE GENERAL DE INESTABILIDAD PARA TERRAPLENES CARRETEROS (IGETC).

El Índice General de Estabilidad de Terraplenes Carreteros (IGETC) es un valor representativo de la sumatoria de las puntuaciones dadas a cada uno de los factores (3, 9,27 y 81) que caracterizan a la falla y/o problema que se genera en la estructura terrea.

Mediante el valor numérico obtenido (IGETC) lo clasificamos de acuerdo a los rangos establecidos para cada nivel de inestabilidad (Bajo, Medio y Alto). Por lo que, entre más grande sea el valor, mayor será la severidad en cada caso.

Como se mencionó anteriormente, al obtener el IGE no solucionara la falla y/o problema si no brindará un valor calificativo para cada terraplén y con él, desarrollar estrategias optimas de gestión, así como recomendaciones de acciones correctivas y de mantenimiento al momento de presentarse una inestabilidad.

4 Metodología para evaluar el peligro de terraplenes carreteros.

4.1 FACTORES Y MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO.

El desarrollo de la Metodología de Evaluación permitirá a los departamentos de conservación y mantenimiento una clasificación de los terraplenes inestables o próximos a estarlos de acuerdo al nivel de riesgo que presenten. Este nivel de riesgo se obtendrá mediante el Índice General de Estabilidad de Terraplenes Carreteros (IGET), el cual se obtiene de la sumatoria de puntuaciones dadas a los factores que presentan. Para determinar los factores que evalúan la estabilidad de taludes de terraplenes y poder evaluar el tramo carretero Maravatio-Zapotlanejo se adaptaron algunos de los ya establecidos por los diferentes departamentos de transporte como el Oregon Department of Transportation II, Ohio Landslide Hazard Rating System, Washington Department of Transportation (WSDOT), Tennessee Department of Transportation (DOT RHRS) y el Unstable Slope Asset Management Program (Alaska Department of Transportation).

La evaluación de los taludes de terraplenes y el riesgo que presenta está basado en la observación directa del sitio y las características que presenta cada factor, pero es importante considerar otros factores de riesgo utilizados en otros sistemas como frecuencia/costo de mantenimiento, Tránsito Promedio Diario Anual (TDPA), Precipitación, etc. para crear una base de datos; esto descrito con anterioridad en el capítulo dos.

4.1.1 CATEGORIAS DE LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN.

Los factores del Sistema de Evaluación de Riesgo para obtener el IGET son presentados en la Tabla 4.1. A continuación se presenta una descripción detallada.

Tabla 4.1 Factores del sistema de Evaluación de Peligro

No. TERRAPLEN		OBSERVACIONES.		FOTO No. _____ A. _____	
KM.				FECHA ____/____/____	
LONGITUD (m).					
LADO					
CONDICIÓN					
SECO HÚMEDO MOJADO					
FACTOR		PUNTUACIÓN		81	
ANGULO (°)		9		27	
ALTURA (m)		3		27	
ALTURA		9		27	
% DE COBERTURA		9		27	
ESCALONAMIENTO		9		27	
GRIETAS		9		27	
DESGASTE DE LA SUPERFICIE		9		27	
DESPUNTILLAMIENTO		9		27	
FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA		9		27	
SEPARACIÓN DE LA CUNETA / LA VIA		9		27	
OBSTRUCCIONES		9		27	
EROSION		9		27	
ASENTAMIENTO		9		27	
FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO		9		27	
GRIETAS EN BLOQUE		9		27	
GRIETAS DE BORDE		9		27	
GRIETAS LONGITUDINALES		9		27	
GRIETAS TRANSVERSALES		9		27	
AHUELLAMIENTO (RODEANAS)		9		27	
BACHES		9		27	

4.1.1.1 Geometría.

4.1.1.1.1 Ángulo del talud.

El ángulo del talud de terraplén puede modificar con el tiempo debido a las posibles fallas que se den. Si se presenta variación en el ángulo de inclinación, es prueba convincente de un peligro reciente.

Al aumentar la pendiente, generalmente se aumentan las fuerzas que tratan de desestabilizar el talud y disminuyen los factores de seguridad al deslizamiento. El talud recomendado para que no exista defectos de deslizamiento o desprendimientos de materiales es de proporción 1.5:1 o 2:1 (26° y 33° respectivamente). En suelos tropicales con alto contenido de arcilla dentro de zonas muy lluviosas, un talud de terraplén de 3:1 (18°) es recomendable*.

El efecto de la pendiente la podemos esquematizar de acuerdo con la Figura 4.1. Un bloque de peso W descansa sobre una superficie paralela a la pendiente del terreno creando una fuerza que trata de hacer deslizar el bloque (F_d). Al aumentar la pendiente el esfuerzo es mayor. El bloque permanecerá estable hasta que las fuerzas actuantes (F_d) excedan las fuerzas resistentes (F_r).

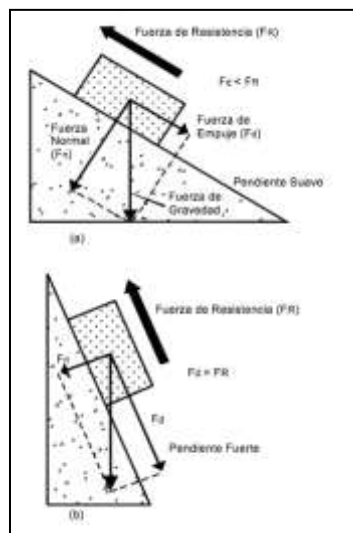


Figura 4.1 Esquema de un bloque sobre una pendiente. Al aumentar la pendiente aumenta la fuerza de empuje (F_d). (Suarez D. 1998).

Para la evaluación de este factor, un mayor ángulo tendrá una puntuación más alta, por significar mayor peligro ante la inestabilidad, se proponen los siguientes factores:

- Peligro Bajo: talud con un ángulo de 20 a 40° .
- Peligro Medio: talud con un ángulo de 40 a 50° .
- Peligro Alto: talud con un ángulo de 50 a 60° .
- Peligro Muy Alto: talud con un ángulo $>$ a 60° .

4.1.1.1.2 Altura del terraplén.

Se debe tener una altura adecuada con proporción al ángulo, para así evitar la falla por cortante de los materiales, lo cual se refleja en el factor de seguridad contra inestabilidad.

Los terraplenes con alturas muy grandes dependen de la resistencia adicional que aporta la succión en condición no saturada del suelo. Sin embargo, el cambio climático y el abandono o falta de mantenimiento de las obras de drenaje producen la saturación de suelos y la falla del talud más frecuente.

Para la evaluación, una altura muy grande traerá problemas de inestabilidad grandes (un mal procedimiento de compactación origina asentamientos severos, falla por desproporción altura-grado de talud, etc.) otorgándole una calificación mayor. Se proponen los siguientes factores:

- Peligro Bajo: altura < a 5 m.
- Peligro Medio: altura comprendida de 5 a 10 m.
- Peligro Alto: altura comprendida de 10 a 20 m.
- Peligro Muy Alto: altura > a 20 m.

4.1.1.1.3 Vegetación.

La vegetación es un elemento fundamental en los aspectos de conservación de suelos, que al sustentarse sobre él ejerce con las raíces una acción de sujeción importante. Por otra parte, el porcentaje de cobertura vegetal actúa como amortiguador del agua de las lluvias, disminuyendo su capacidad erosiva antes de llegar al suelo y disminuyendo la escorrentía superficial (Figura 4.2). Los efectos de refuerzo del suelo por la vegetación son:

- Las raíces y el follaje aíslan el suelo de las fuerzas de tracción directa ocasionadas por el flujo del agua de escorrentía.
- Las raíces refuerzan el suelo aumentando la resistencia al corte (Fricción y Cohesión) y la resistencia a las fuerzas de erosión.
- Las raíces de árboles anclan el suelo o estratos más profundos, creando fuerzas resistentes al deslizamiento.
- Entre el sistema de raíces de cada árbol y los contiguos se forman efectos de arco que ayudan en la estabilidad de la masa de suelo.
- Las raíces forman una red densa entre tejida en los primeros 30 a 50 centímetros de suelo, y esta red forma una membrana lateral que tiende a reforzar la masa de suelo más superficial y sostenerla en el sitio.

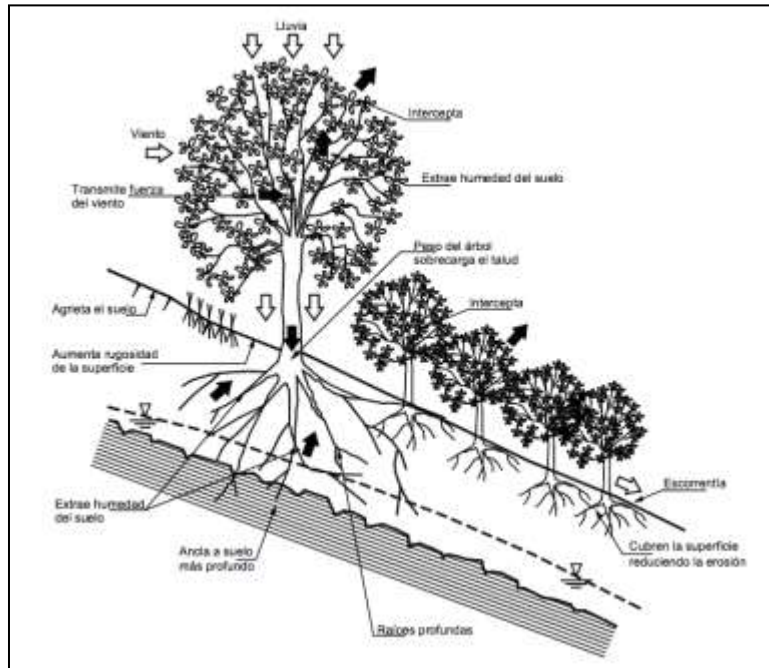


Figura 4.2 Efectos de la vegetación sobre la estabilidad de un talud. (Suarez D. 2001)

Aunque directamente no se pueda considerar la presencia o ausencia de vegetación en un área como el factor condicionante por tratarse de un elemento protector del suelo y condicionante del comportamiento hidrológico. En consecuencia es de interés para la evaluación IGET (Indicé de Gestión de Estabilidad de Terraplenes) conocer que altura de vegetación existe y cuál es el porcentaje cubierto en la zona.

4.1.1.1.4 Altura.

Una cobertura vegetal de gran altura puede generar mayor erosión por impacto de gotas de lluvia que una lluvia que cae directamente sobre el suelo sin ser interceptada por la vegetación (Figura 4.3). Para que una cobertura vegetal proteja eficientemente contra la erosión de las gotas de lluvia, se requiere que ésta sea de poca altura. Los árboles altos solos no protegen contra la erosión de las gotas de lluvia.

Para la evaluación de este factor, una mayor altura de vegetación tendrá una puntuación más alta, debido al impacto producido por las gotas de lluvia. Se propone los siguientes valores:

- Peligro Bajo: altura de la vegetación < a 15 cm.
- Peligro Medio: altura de la vegetación de 15 a 30 cm.
- Peligro Alto: altura de la vegetación de 30 a 60 cm.
- Peligro Muy Alto: altura de la vegetación.

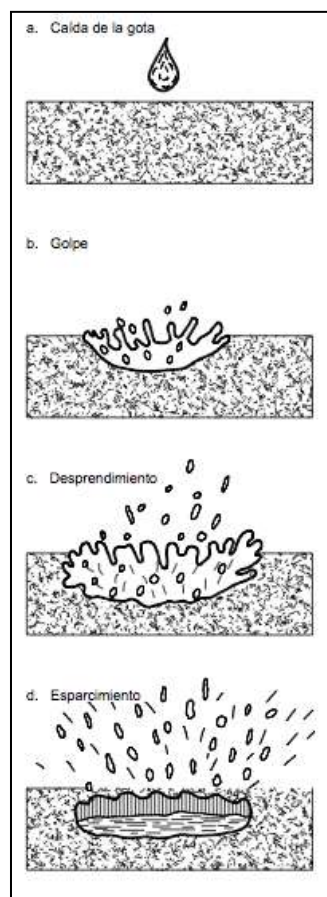


Figura 4.3 Erosión por el impacto de una gota de lluvia. (Suarez D. 2001)

4.1.1.1.5 Cobertura de la vegetación.

El potencial erosivo del agua puede ser disminuido por el tipo, cantidad y tamaño de la vegetación; esto debido a que:

- La vegetación forma una cubierta protectora que evita el impacto directo de la lluvia en el suelo. Es decir, actúa reduciendo el volumen de precipitación potencialmente erosivo.
- Disminuye localmente la intensidad de la precipitación al retrasar la llegada del agua al suelo.
- La intercepción disipa, o reduce, la energía cinética de las gotas de lluvia al frenar su caída.

Por lo tanto, para poder determinar los rangos que se utilizan en la puntuación de este factor se debe de evaluar el grado de cobertura vegetal, el cual determina la superficie de suelo que queda protegida contra el impacto directo de la lluvia. La máxima protección es proporcionada por una cubierta mayor o igual al 75% de la superficie total y por ende, la mínima protección será cuando la vegetación sea escasa o nula. En base a esto se establecen los siguientes parámetros:

- Vegetación Densa (3 puntos): talud cubierto del 75 a 100 %.
- Vegetación Moderada (9 puntos): talud cubierto del 50 a 75%.
- Vegetación Esparcida (27 puntos): talud cubierto del 25 a 50%.
- Vegetación Descubierta (81 puntos): talud cubierto del 0 a 25%.

4.1.1.2 Obras de drenaje.

El sistema de drenaje es el conjunto de obras que permite un manejo adecuado de los fluidos, para lo cual es indispensable considerar los procesos de captación, conducción y evaluación de los mismos. El exceso de agua u otros fluidos en el suelo o en la estructura de la carretera, afecta sus propiedades geo mecánicas, los mecanismos de transferencia de carga, presiones de poros, subpresiones de flujo, presiones hidrostáticas, e incrementa la susceptibilidad a los cambios volumétricos. Por tal motivo, y aun cuando el agua es un elemento fundamental para la vida, es también una de las causas más relevantes del deterioro prematuro de la infraestructura vial.

El objetivo de este tipo de obras es el de conducir la aguas de escorrentía o de flujo superficial, rápida y controladamente hasta su disposición final. De esta manera, se convierten en un soporte importante para el control de la erosión en taludes y la protección de la estructura del pavimento, permitiendo la rápida evacuación del agua que, además de afectar la estructura, afecta la seguridad del usuario. Las obras de drenaje pueden clasificarse en obras para el control de aguas superficiales y obras para el manejo de flujos subterráneos o subsuperficiales.

El drenaje superficial se consideran las obras que actúan directamente sobre la carretera, estas pueden ser longitudinales y transversales según la posición que estas guarden con respecto al eje de la vía; así como también las obras para el control de erosión de taludes que resultan ser muy importantes en la estabilidad de esta.

El drenaje longitudinal tiene por objeto captar los fluidos de agua para evitar que lleguen a la vía o permanezcan en ella causando desperfectos. A este grupo pertenecen las cunetas y bordillos. El drenaje transversal son aquellos elementos que transportan agua cruzando el eje de la carretera; por lo general, el cruce se realiza de manera perpendicular al eje y transportan el aporte de la cuenca que se encuentra aguas arriba de la vía en dirección aguas abajo.

Las obras para el control de erosión de taludes conducen las aguas a zonas seguras donde no se afecte la estabilidad de los taludes. En estas obras se encuentran, las contracunetas, los canales colectores y los disipadores.

Debido a que las obras de drenaje longitudinal generan mayor problema de estabilidad al fallar, ya que actúan directamente sobre la carretera; son las que tomaremos en cuenta para la evaluación del IGE; mencionando solamente en las

obras de drenaje transversal los daños más comunes y su forma de poder evaluarlos.

4.1.1.2.1 Drenaje longitudinal.

Son canales abiertos contruidos en los costados de las carreteras. El objetivo principal de estas obras es:

- Recoger las aguas de escorrentía procedentes de la calzada, evitando así encharcamientos en la vía que disminuyen el nivel de servicio de la misma y que pueden causar problemas por infiltración a las capas subyacentes.
- Recoger las aguas de escorrentía procedentes de los taludes de cortes y laderas adyacentes.

Su sección transversal es variable según lo determine el diseño, siendo común la de forma triangular, aunque también se puede construir de forma trapezoidal y cuadrada.

Se presenta a continuación algunos de los daños más comunes en cunetas, así como la forma en que deben de registrarse para su evaluación del IGE; tomando en consideración el criterio personal.

4.1.1.2.1.1 Escalonamiento.

Desnivel entre dos tableros de concreto separados por una junta transversal o desnivel en la junta entre la cuneta y el pavimento.

Niveles de severidad. Teniendo en cuenta la separación entre las superficies de los tableros, la clasificación de severidades y evaluación es:

- Baja: sin ningún problema de escalonamiento.
- Media: separación < 6 mm.
- Alta: 6 mm < separación < 25 mm.
- Muy Alta: separación > 25 mm.

Deberá anotarse junto con la severidad, la longitud de cuneta afectada en metros.

4.1.1.2.1.2 Grietas.

Son el resultado de esfuerzos que actúan sobre el concreto. Pueden estar relacionadas con problemas intrínsecos del concreto incluyendo los defectos constructivos y en muchos casos tiene su origen en las cargas de tránsito aplicadas de manera rápida o lenta. Las cunetas en general no se diseñan para soportar cargas, sin embargo las condiciones geométricas de las vías y en algunos casos la imprudencia de los usuarios hacen inevitable que estas estructuras trabajen con esfuerzos que superan su resistencia. Es indispensable cuando se realice la inspección, tratar de identificar si las grietas son causadas por efectos del tráfico o por el contrario tiene su origen en la calidad de los materiales o defectos constructivos.

Niveles de severidad. Teniendo en cuenta la abertura de la grieta, las severidades y forma de evaluación que se proponen son:

- Baja: fisuras selladas que no permitan infiltración de agua fácilmente.
- Media: grietas < 3 mm.
- Alta: grietas de 3 a 10 mm. En donde se puede observar la presencia de material granular tipo arena y alguna presencia de vegetación.
- Muy Alta: grietas > 10 mm. En donde se observa un potencial de infiltración importante con material granular y presencia o no de vegetación.

4.1.1.2.1.3 Desgaste de la superficie.

Corresponde al deterioro de la superficie de la cuneta y está relacionada con altas velocidades de flujo, mala calidad de los materiales, y la acción del tránsito así como otros agentes abrasivos y/o erosivos. Esta patología es evidente por la pérdida del material de recubrimiento y presencia de agregados con una cara plana en la superficie, en algunos casos hay pérdida de los agregados superficiales. Es muy común encontrar esta patología en sectores donde existen curvas horizontales, ocasionada por el tránsito de los vehículos.

Niveles de severidad:

- Bajo: sin desgaste del recubrimiento.
- Medio: se ha perdido recubrimiento del agregado que ha comenzado a desgastarse, pero no de manera significativa.
- Alta: la superficie del concreto es moderadamente rugosa y hay pérdida leve de partículas, sin embargo, no se observa socavación significativa.
- Muy Alta: la superficie está muy rugosa y presenta pérdida de partículas, puede presentarse socavación que genera un canal más pequeño por donde pasa el flujo.

Durante la inspección deberá registrarse en observaciones el área afectada en metros cuadrados y el número de tableros de cuneta involucrados en el daño.

4.1.1.2.1.4 Despostillamiento.

Consiste en la desintegración de las aristas o del borde de una junta, longitudinal o transversal o una grieta, con pérdida de trozos y que puede afectar hasta unos 5 cm. dentro de la cuneta.

Niveles de severidad. Teniendo en cuenta la distancia entre la junta y el borde externo del despostillamiento, la evaluaremos en:

- Baja: distancia < a 1 cm.
- Mediana: distancia de 1 a 5 cm.
- Alta: distancia de 5 a 15 cm.
- Muy Alta: distancia > a 15 cm.

4.1.1.2.1.5 Fracturamiento de la estructura.

Este daño se presenta cuando la cuneta presenta agrietamientos en bloques de tamaño mayor de 30 cm. x 30 cm. se considera que hay fracturamiento cuando se presenta más de dos bloques en un tablero, de lo contrario deberán reportarse como grietas.

Niveles de severidad. En base a la observación de la estructura e identificar la presencia de fracturamiento, la evaluaremos en:

- Baja: presencia de solo un bloque en el tablero de la cuneta, mínima infiltración.
- Media: existen más de dos bloques en el tablero de la cuneta sin embargo no hay desplazamientos ni hundimientos del concreto y no se observa infiltración excesiva.
- Alta: los bloques presentan una separación entre 3 mm. y 10 mm. con algún desplazamiento, sin hundimientos.
- Muy Alta: los bloques presentan separaciones entre si mayores de 10 mm. adicionalmente hay desplazamientos y hundimientos que permiten infiltración de agua a las capas inferiores. Puede existir remoción total o parcial del concreto y no hay continuidad en la cuneta.

Durante la inspección deberá registrarse en observaciones el número de tableros fallados, así como también si hay pérdida del concreto.

4.1.1.2.1.6 Separación de la cuneta con la vía.

Esta patología indica el ensanchamiento de la junta existente entre la calzada y la cuneta.

Niveles de severidad. De acuerdo a la distancia de separación existente, se evaluara en:

- Bajo: separación < a 1 mm.
- Medio: separación de 1 a 3 mm.
- Alto: separación de 3 a 10 mm.
- Muy Alta: separación > a 10 mm.

4.1.1.2.1.7 Obstrucciones.

Consiste en el depósito de sedimentos que generan un estancamiento del agua. Esta patología está relacionada con la velocidad de flujo en la cuneta, ya que a bajas velocidades se pueden presentar depósitos. También puede presentarse por depósito de materiales abandonados por reparaciones pasadas de la vía y/o provenientes de taludes adyacentes a la cuneta.

Niveles de severidad. En base a la observación e identificar la presencia de obstrucciones en la estructura, la evaluaremos en:

- Baja: piedras con diámetro muy pequeño dispersas en la sección.
- Media: menos del 1% de la sección se encuentra con material tanto transportado como del que proviene de taludes adyacentes.
- Alta: la cuenta se encuentra obstruida en un 30% de su sección transversal.
- Muy Alta: la cuneta presenta obstrucción en más del 30% de su sección transversal.

4.1.1.2.2 Drenaje transversal.

Son estructura de evacuación de las aguas de escorrentía y su función es la de drenar corrientes de agua permanentes o estacionales. También se les denomina alcantarillas a las estructuras que permiten evacuar en sitios predeterminados los caudales entregados por las cunetas (lavaderos), que a su vez recogen las aguas de lluvias que caen sobre la calzada. Se consideran aquí las alcantarillas en donde el agua fluye con una superficie libre por la tubería.

Cabe recalcar que las alcantarillas aquí mencionadas están compuestas por tuberías de concreto y/o metálicas. Se presentan a continuación algunos de los daños más comunes en alcantarillas así como el criterio a usar para su evaluación. Esto para alcantarillas de sección circular; para el caso de alcantarillas de sección cuadrada se puede aplicar un criterio similar.

- Grietas en aleros, muro cabezal y lavaderos: Este tipo de daños afecta tanto la estabilidad como la funcionalidad de la estructura. Se deberá registrar la longitud y el ancho en metros y la profundidad de la grieta en metros o milímetros.
- Grietas verticales en la unión entre el muro cabezal y los aleros: Este tipo de daño afecta la estabilidad así como la funcionalidad de la estructura. Deberá registrarse la longitud y el ancho en metros y la profundidad de la grieta en metros o milímetros.
- Fractura con pérdida parcial o total de la tubería: Este tipo de daño permite infiltraciones de agua al terreno afectando la estabilidad de la estructura. Se deberá de registrar el número y la longitud en metros de las alcantarillas afectadas.
- Separación de secciones de tubería permitiendo infiltración de agua: Este daño deberá registrarse indicando el número de alcantarillas que se encuentran separados y la distancia promedio de separación entre los mismos en metros. Deberá hacerse anotaciones con respecto a procesos de inestabilidad que estén afectando el terreno y/o la vía.
- Hundimientos o aplastamientos de secciones de tubería: Este daño generalmente está asociado a asentamientos y hundimientos de la superficie del terreno. Se deberá registrar el número de alcantarillas afectadas y si es posible el desplazamiento vertical promedio de las mismas en metros.

- Socavación del concreto y terreno natural de aleros y/o salida de tubería en muro cabecial: Los efectos de la socavación sobre las estructuras son conocidos, provocando en la mayoría de los casos el colapso. Se deberá de registrar el elemento de la alcantarilla que presenta la socavación así como el área aproximada de afectación en metros cuadrados. Además se deberá verificar si existe socavación que esté removiendo el suelo de cimentación de los diferentes componentes de la alcantarilla.

4.1.1.3 Erosión.

La erosión es el desprendimiento, transporte y depósito de partículas o masas pequeñas de suelo o roca, por la acción de las fuerzas generadas por el movimiento del agua. El flujo puede concentrarse en canales produciendo surcos y cárcavas. Las gotas de lluvia contribuyen al desprendimiento de las partículas o granos, lo cual produce sedimentación de materiales en el pie del talud.

La erosión laminar consiste en el desprendimiento y transporte en capas bien definidas superficiales de suelo por acción de la escorrentía difusa (Figura 4.4).

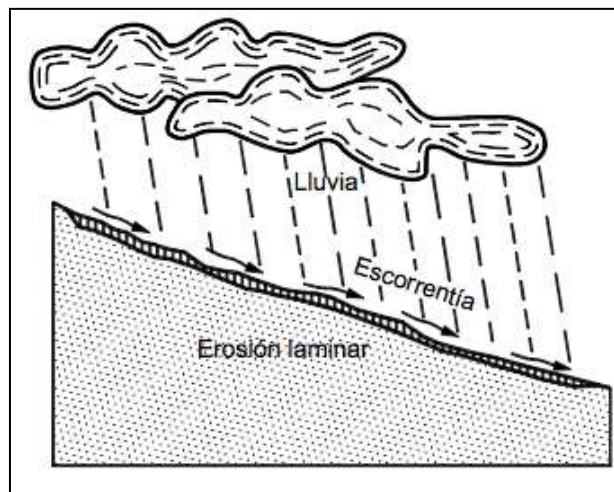


Figura 4.4 Proceso de Erosión Laminar. (Suarez D. 2001)

El suelo se va perdiendo casi en forma imperceptible. Este tipo de erosión es muy común en los suelos que presentan zonas sin cobertura vegetal.

La acción de las gotas de lluvia altera el suelo superficial. El agua parcialmente se infiltra y parcialmente se acumula sobre la superficie del terreno formándose una capa delgada de agua con flujos de 2 a 3 milímetros de espesor. El flujo laminar es poco profundo en la cresta de la ladera pero la profundidad de flujo aumenta talud abajo. El flujo propiamente laminar tiene poco poder erosivo pero en partes se convierte en turbulento, aumentando en forma importante su capacidad de erosión. Al continuar la acción de la lluvia y al mismo tiempo ocurrir el flujo se

genera turbulencia en el flujo, aumentando la capacidad de erosión. El flujo de agua toma un color marrón o amarillo por la presencia de sedimento.

La erosión en surcos ocurre cuando el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural de la superficie. Al concentrarse el flujo en pequeñas corrientes sobre una pendiente, se genera una concentración del flujo el cual por la fuerza tractiva de la corriente produce erosión, formándose pequeños surcos o canales, los cuales inicialmente son prácticamente imperceptibles pero poco a poco se van volviendo más profundos. En estos surcos la energía del agua en movimiento adquiere cada vez, una fuerza mayor capaz de desprender y transportar partículas de suelo. Inicialmente, los pequeños canales presentan una forma en V la cual puede pasar a forma en U. (Figura 4.5).

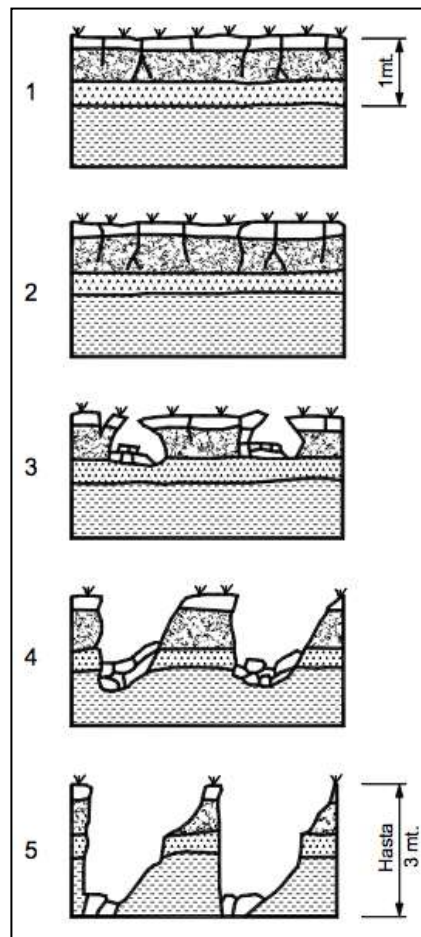


Figura 4.5 Proceso de formación de surcos y cárcavas. (Suarez D. 2001)

La profundidad del canal va aumentando. Estos flujos adquieren velocidades cada vez mayores. La energía de este flujo concentrado empieza desprender partículas de suelo incorporándolas al flujo, convirtiendo estos micro-flujos concentrados en las rutas preferenciales de los sedimentos.

La erosión se aumenta cuando el espesor del flujo es muy cercano al diámetro de las gotas de lluvia (0.5 a 5 mm); las partículas de suelo son removidas por el golpeo de la lluvia y transportadas por el flujo, aún con pendientes muy pequeñas. El agua dentro del surco presenta considerable turbulencia y puede erosionar partículas relativamente grandes. Los suelos más susceptibles a formación de surcos son los suelos expuestos al agua sin cobertura vegetal alguna. Entre mayor sea la cobertura vegetal superficial, la susceptibilidad a la formación de surcos disminuye. Al profundizarse y ampliarse los surcos de erosión se convierten en cárcavas, o varios pequeños surcos pueden unirse y crecer para formar una cárcava.

Las cárcavas son canales mucho más largos que los surcos. Estos canales transportan corrientes concentradas de agua durante e inmediatamente después de las lluvias. Las cárcavas van avanzando o remontando hacia arriba formando una o varias gradas o cambios bruscos de pendiente (Figura 4.6).

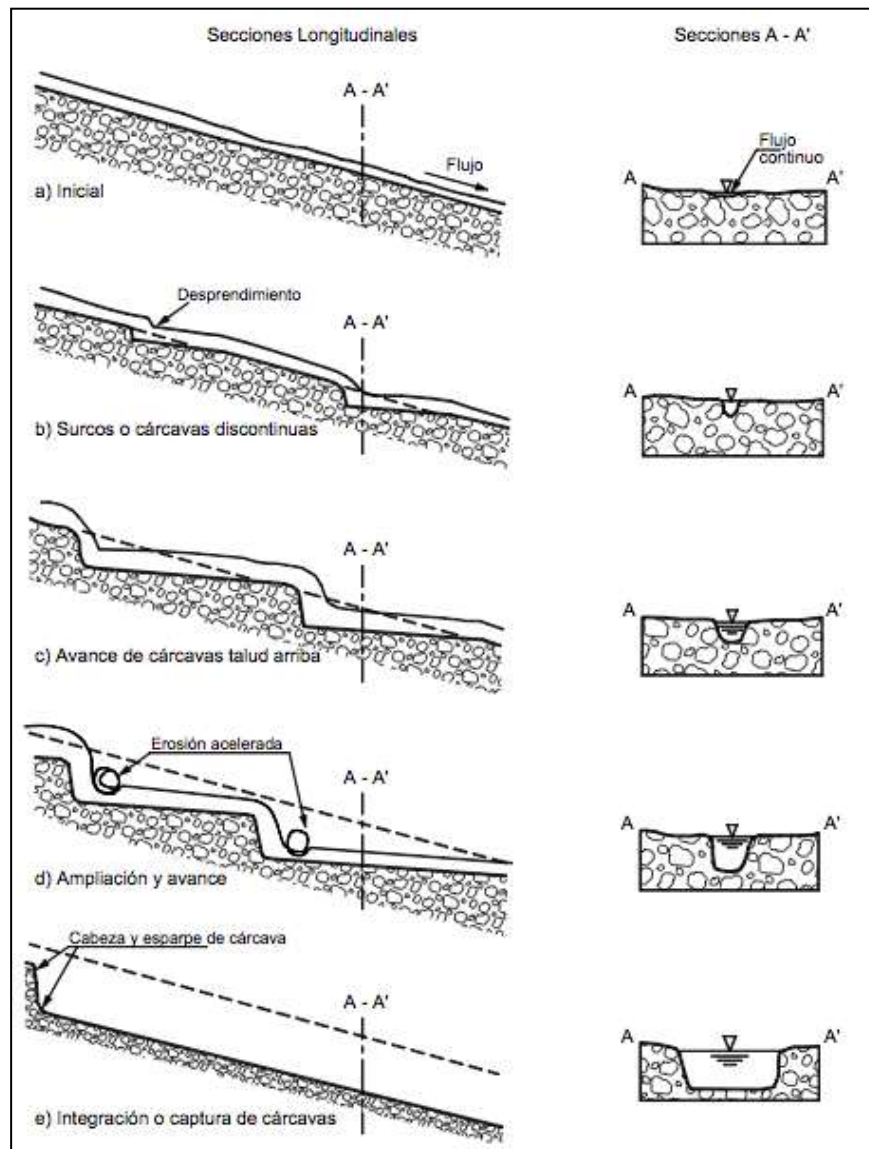


Figura 4.6 Etapas en el desarrollo de una cárcava (Suarez D. 2001)

Con base en las características de la erosión que se presentan en un talud de terraplén, proponemos los siguientes parámetros de evaluación:

- Peligro Bajo: sin presencia de erosión.
- Peligro Medio: erosión leve en el talud (erosión laminar y/o pequeños surcos).
- Peligro Alto: erosión moderada en el talud (surcos grandes asociado con zanjas o cárcavas).
- Peligro Muy Alto: erosión severa (presencia de zanjas o cárcavas).

4.1.1.4 Asentamiento.

La forma y el relieve de la depresión que salva un terraplén, puede influir de modo decisivo en el origen de los asentamientos diferenciales.

La disipación de las posibles presiones intersticiales generadas en el proceso constructivo, darán lugar a los asentamientos diferidos correspondientes. Ese carácter de que las deformaciones se presentan de modo diferido, una vez terminado el relleno y sobre todo si son posteriores a la colocación del pavimento o de la superestructura es el aspecto que mayor incidencia práctica tiene, pues los asentamientos constructivos no llevan efectos perniciosos, en principio.

Los posibles cambios de volumen que por variaciones de la humedad sea susceptible de sufrir el suelo compactado, es un factor esencial postconstructivo de deformación.

Los asentamientos diferidos, asociados a fenómenos reológicos y entre los que se incluyen los asociados a efectos de humectación y consolidación secundaria, son tanto mayores cuando más bajo es el coeficiente de seguridad y cuanto mayor es el campo de humedad.

Las obras de drenaje enterradas en los rellenos compactados, así como otros casos similares (estribos de puente, etc.) propician el origen de fuertes asentamientos, al tratarse de estructuras rígidas anexos a la estructura de tierra.

Con objeto de disminuir las deformaciones diferenciales asociadas a la estructura rígida (drenaje, puentes) se introducen unas zonas o bloques ejecutados con un material distinto, más rígido que el del relleno, que por esa deformabilidad intermedia y por su geometría, reduce los efectos perniciosos sobre la estructura.

Para la evaluación de las deformaciones que pueden sufrir los terraplenes, existen distintos métodos, como los más completos que aplican modelos constitutivos complejos para el comportamiento esfuerzo- deformación de los suelos, los cuales no cabe entrar en detalle, ya que nuestra evaluación será exclusivamente empírico basado en las observaciones. Proponiendo los factores que se involucran de acuerdo a la peligrosidad que presentaría la visualización del asentamiento:

- Peligro bajo: ninguna evidencia de asentamiento.

- Peligro Medio: asentamiento poco evidente en la calzada.
- Peligro Alto: asentamiento evidente en la calzada.
- Peligro Muy Alto: asentamiento muy evidente en la calzada.

En varios tipos de casos se ha observado que los asentamientos abarcan grandes periodos de tiempo. Movimientos que, por otra parte, no llegan hacer premonitores de sistemas de inestabilidad.

4.1.1.5 Fallas en el pavimento.

Los daños más comunes que se presentan en la estructura del pavimento flexible, así como su severidad, causas de origen y forma de evaluarlos se presentan a continuación de acuerdo a los estudios realizados por el Departamento de Transporte de Washington (WSDOT) conjunto con la Federal Highway Administration (FHWA).

4.1.1.5.1 Fisuras y grietas por fatigamiento.

Se produce en las zonas sometidas a cargas repetidas del tráfico. Puede ser una serie de grietas y/o fisuras interconectadas con patrones irregulares; la fisuración tiende a iniciarse en el fondo de las capas asfálticas, donde los esfuerzos de tracción son mayores bajo la acción de las cargas. Las fisuras se propagan a la superficie inicialmente como una o más fisuras longitudinales paralelas. Ante las cargas repetidas del tráfico, las fisuras se propagan formando piezas angulares que desarrollan un patrón de piel de cocodrilo, por lo general con un diámetro menor de 30 cm (Figura 4.7).

Si la base y la sub-base son débiles, el fisuramiento será acompañado por ahuellamientos. Cuando el drenaje es inadecuado, el fisuramiento se presentará en primera estancia, en las huellas de canalización exteriores. En su etapa final, el agrietamiento se transforma en bache.

Posibles causas. Las causas más frecuentes en la falla por fatigamiento son:

- Espesor de estructura insuficiente.
- Deformaciones de la subrasante.
- Rigidización de la mezcla asfáltica en zonas de carga (por oxidación del asfalto o envejecimiento).
- Problemas de drenaje que afectan a los materiales granulares.
- Compactación deficiente de las capas granulares o asfálticas.
- Deficiencias en la elaboración de la mezcla asfáltica: exceso de mortero en la mezcla, uso de asfalto de alta penetración (hace deformable la mezcla), deficiencia de asfalto en la mezcla (reduce el módulo).
- Reparaciones mal ejecutadas, deficiencias de compactación, juntas mal elaboradas e implementación de reparaciones que no corrigen el daño.

Todos estos factores pueden reducir la capacidad estructural o inducir los esfuerzos adicionales en cada una de las capas del pavimento, haciendo que ante

el paso del tránsito se generen deformaciones que no son admisibles para el pavimento que se pueden manifestar mediante fisuración.

Nivel de severidad y evaluación:

- Baja (3 puntos): serie de fisuras longitudinales paralelas muy finas (con aberturas menor a 2 mm), que no presentan despostillamiento, ninguna conexión entre ellas y no existe evidencia de bombeo.
- Media (9 puntos): serie de fisuras longitudinales paralelas (aberturas de 2 a 3 mm), principalmente en la huella, que no presentan despostillamiento, con poca conexión entre ellas y no existe evidencia de bombeo.
- Alta (27 puntos): las fisuras han formado un patrón de polígonos pequeños y angulosos, que pueden tener un ligero desgaste en los bordes y aberturas de 1 mm a 3 mm, sin evidencia de bombeo.
- Muy Alta (81 puntos): las fisuras han progresado a manera de constituir una malla cerrada de polígonos (abertura > a 3 mm) con despostillamiento en los bordes y los bloques se encuentran sueltos y ser removidos ante el tránsito formando baches. Presencia de bombeo.

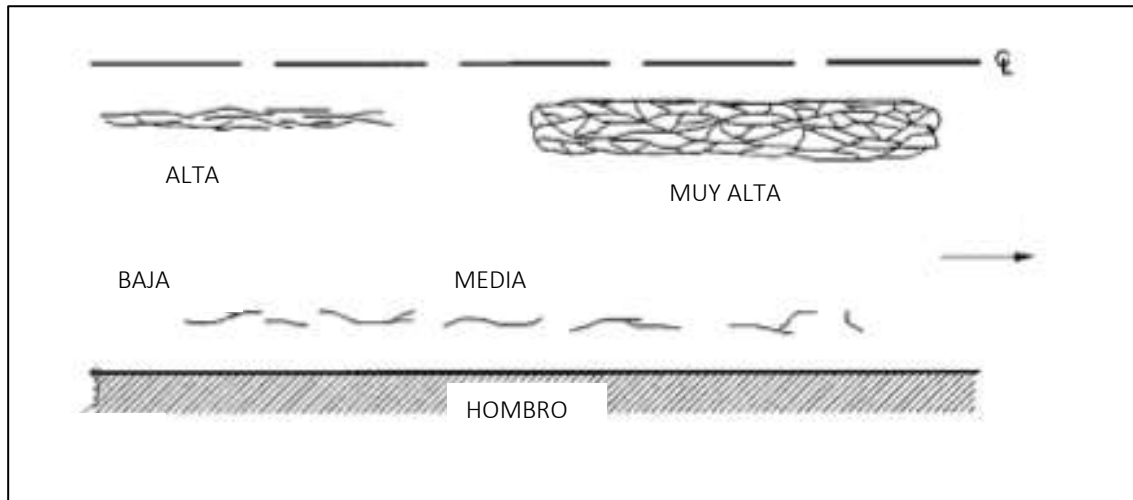


Figura 4.7 Fisuras y grietas por fatigamiento. (FHWA, 2003)

4.1.1.5.2 Fisuras y grietas en bloque.

Serie de fisuras interconectadas formando piezas aproximadamente rectangulares, con un área variable de 0.10 a 10.0 m². La fisura en bloque se presenta normalmente en una gran área del pavimento y algunas veces ocurren solamente en las áreas no afectadas por el tráfico.

Este deterioro difiere de la piel de cocodrilo en que esta última aparece en áreas sometidas a carga, mientras que los bloques aparecen usualmente en áreas no cargadas.

Sin embargo, es usual encontrar fisuras en bloque que han evolucionado en piel de cocodrilo por acción del tránsito. Por otra parte, la piel de cocodrilo generalmente está formada por bloques con más lados y ángulos agudos (Figura 4.8).

Posibles causas.

- La fisuración en bloques es causada principalmente por la contracción del concreto asfáltico debido a la variación de la temperatura durante el día, lo cual se traduce en ciclos de esfuerzo-deformación sobre la mezcla. La presencia de este tipo de fisuras indica que el asfalto se ha endurecido significativamente, lo cual sucede debido al envejecimiento de la mezcla o al uso de un tipo de asfalto inadecuado para las condiciones climáticas de la zona.
- Reflejo de grietas de contracción provenientes de materiales estabilizados utilizados como base.
- Combinación del cambio volumétrico del agregado fino de la mezcla asfáltica con el uso de un asfalto de baja penetración.

Niveles de severidad y evaluación.

- Bajo (3 puntos): formación de bloques, no claramente definidos con un ancho de abertura < 1 mm, o aberturas selladas con material de sello en condiciones satisfactorias que no permiten la filtración de agua.
- Medio (9 puntos): bloques con fisuras de 1 a 3 mm de ancho, con principio de despostillamiento en los bordes. O aberturas selladas con el material de sello en condiciones insatisfactorias.
- Alto (27 puntos): bloques definidos con fisuras de 3 a 10 mm de ancho, despostillamiento menor en los bordes.
- Muy Alto (81 puntos): bloques bien definidos por fisuras > 10 mm de ancho, con presencia de severo despostillamiento en los bordes.

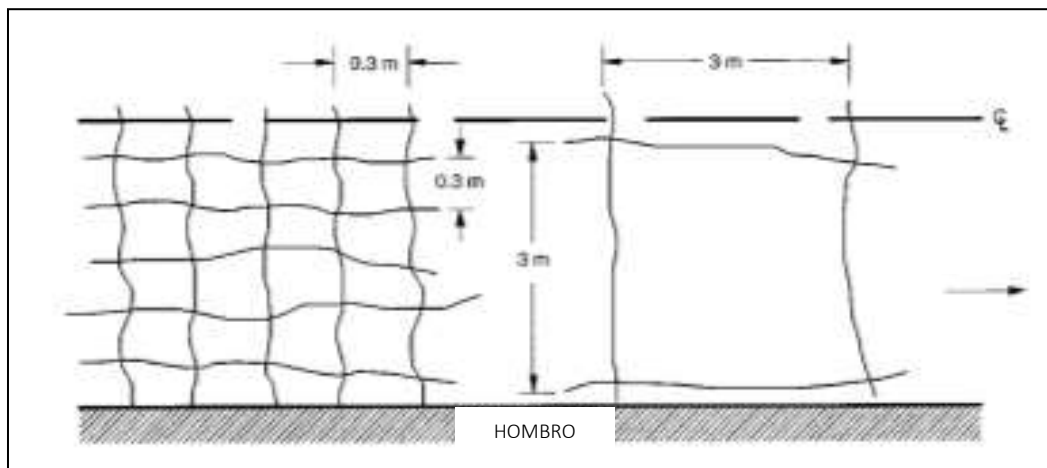


Figura 4.8 Fisuras y grietas en bloque. (FHWA, 2003)

4.1.1.5.3 Grietas de borde.

Son fisuras con tendencia longitudinal a semicircular localizadas cerca del borde de la calzada, se presentan principalmente por la ausencia de acotamiento o por la diferencia de nivel entre el acotamiento y la calzada. Generalmente se localizan dentro de una franja paralela al borde, con un ancho máximo de 60 cm.

Posibles causas. La falta de confinamiento lateral de la estructura debido a la carencia de bordillos, anchos de acotamientos insuficientes o sobrecarpetas que llegan hasta el borde del carril y quedan en desnivel con el acotamiento; en estos casos la fisura es generada cuando el tránsito circula muy cerca del borde. Las fisuras que aparecen por esta causa generalmente se encuentran a distancias entre 30 a 60 cm. del bode de la calzada (Figura 4.9).

- Niveles de severidad y evaluación.
- Bajo (3 puntos): inicio de grieta, fisuras muy finas en el borde de la calzada.
- Medio (9 puntos): Grietas sin ruptura o pérdida de material en un tramo < del 3% de la longitud de la porción afectada del pavimento.
- Alta (27 puntos): Grietas con algunas desintegraciones y pérdida de material en un tramo del 3 al 10% de la longitud de la porción afectada del pavimento.
- Muy Alta (81 puntos): Grietas con ruptura considerable y pérdida de material en un tramo > del 10 % de la longitud de la porción afectada del pavimento.

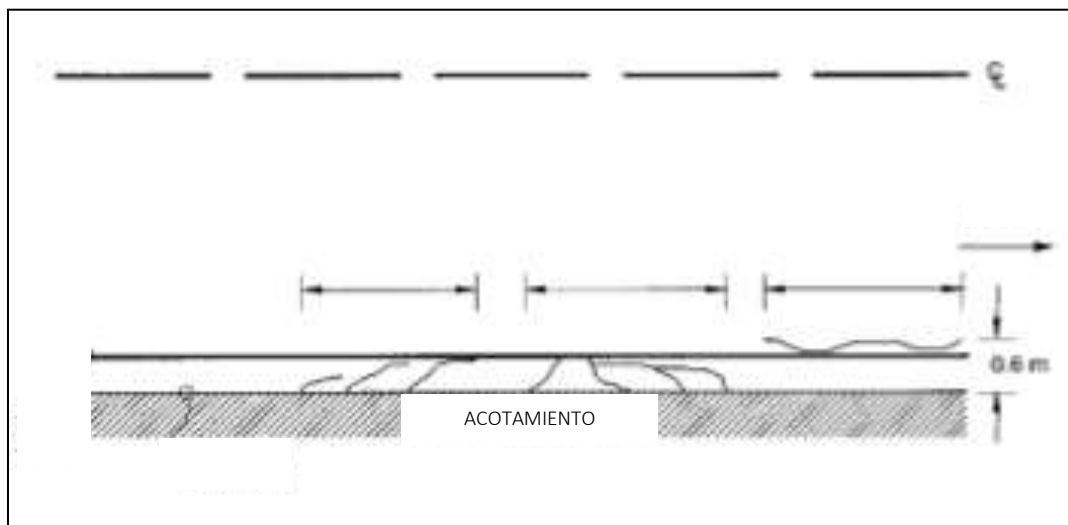


Figura 4.9 Grietas de borde. (FHWA, 2003)

4.1.1.5.4 Grietas longitudinales.

Fisuras y/o grietas que se extiende a través de la superficie del pavimento, paralelamente al eje de la carretera, pudiendo localizarse en las huellas de canalización de tránsito, en el eje o en los bordes del pavimento (Figura 4.10).

Posibles causas.

- Rigidización de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad debido a un exceso de filler, o al envejecimiento del asfalto, ocurriendo bajas temperaturas o gradientes térmicos altos (superiores a 30°).
- Reflexión de grietas de las capas inferiores, generadas en materiales estabilizados o por grietas o juntas existentes en placas de concreto hidráulico adyacentes.
- Fatiga de la estructura, usualmente se presenta en las huellas del tránsito.

Niveles de severidad.

- Bajo (3 puntos): abertura de la fisura < a 1 mm, o aberturas selladas con material de sello en condiciones satisfactorias que no permiten la filtración de agua.
- Medio (9 puntos): abertura de la fisura de 1 a 3 mm o aberturas selladas con el material de sello en condiciones insatisfactorias.
- Alto (27 puntos): abertura de la grieta de 3 a 10 mm, pueden existir algunas fisuras con patrones irregulares de severidad baja en los bordes o cerca de ellos; existe una alta probabilidad de infiltración del agua a través de ella.
- Muy Alto (81 puntos): abertura de la grieta > a 10 mm y fisuras con patrones irregulares de severidad media o alta en los bordes o cerca de ellos.

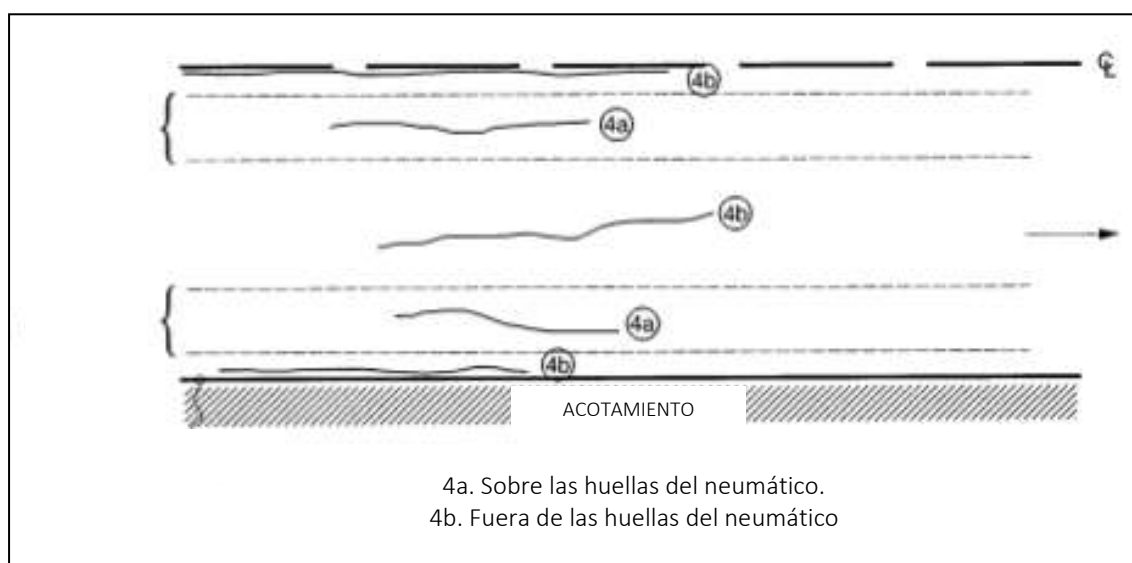


Figura 4.10 Grietas Longitudinales. (FHWA, 2003)

4.1.1.5.5 Grietas transversales.

Fisuras y/o grietas que se extiende a través de la superficie del pavimento, situadas perpendicularmente al eje de la calzada (Figura 4.11).

Posibles causas.

- Pueden corresponder a zonas de contacto entre corte y terraplén por la diferencia de rigidez de los materiales de la subrasante.
- Riego de liga insuficiente o ausencia total.
- Espesor insuficiente de la capa de rodadura.
- Rigidización de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad debido a un exceso de filler, o al envejecimiento del asfalto, ocurriendo bajas temperaturas o gradientes térmicos altos (superiores a 30°).
- Reflexión de grietas de las capas inferiores, generados en materiales estabilizados o por grietas o juntas existentes en placas de concreto hidráulico adyacentes.

Niveles de severidad.

- Bajo (3 puntos): abertura de la fisura < a 1 mm, o aberturas selladas con material de sello en condiciones satisfactorias que no permiten la filtración de agua.
- Medio (9 puntos): abertura de la fisura de 1 a 3 mm o aberturas selladas con el material de sello en condiciones insatisfactorias.
- Alto (27 puntos): abertura de la grieta de 3 a 10 mm, pueden existir algunas fisuras con patrones irregulares de severidad baja en los bordes o cerca de ellos; existe una alta probabilidad de infiltración del agua a través de ella.
- Muy Alto (81 puntos): abertura de la grieta > a 10 mm y fisuras con patrones irregulares de severidad media o alta en los bordes o cerca de ellos, puede causar movimientos bruscos a los vehículos.

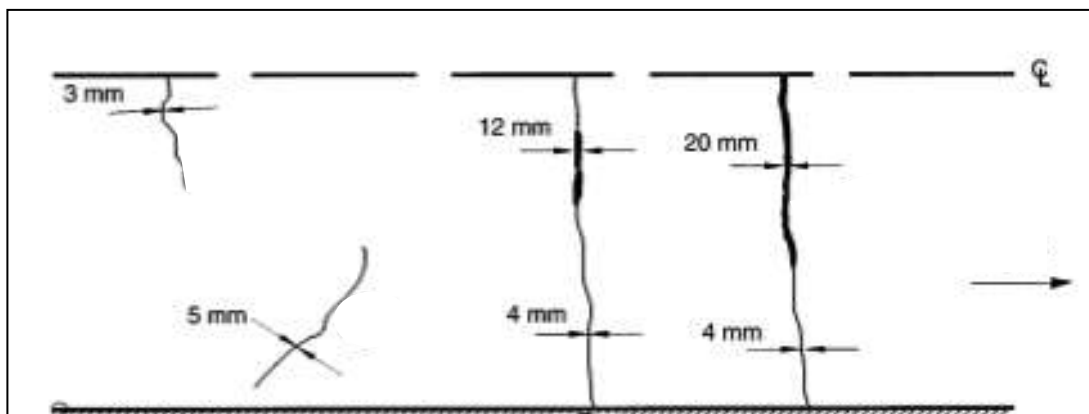


Figura 4.11 Grietas Transversales. (FHWA, 2003)

4.1.1.5.6 Ahuellamiento (roderas).

Es una depresión longitudinal de la superficie en la trayectoria de las llantas de los vehículos. Un ahuellamiento significativo puede llevar a la falla estructural del pavimento y posibilitar el hidroplaneo por el almacenamiento de agua (Figura 4.12).

Posibles causas. Ocurre principalmente debido a una deformación permanente de alguna de las capas del pavimento o de la subrasante, generada por deformación plástica del concreto asfáltica o por deformación de la subrasante debido a la fatiga de la estructura ante la repetición de cargas.

La deformación plástica de la mezcla asfáltica tiende a aumentar en climas cálidos, y también puede darse por una compactación inadecuada de las capas durante la construcción, por el uso de asfaltos blandos o de agregados redondeados.

La falla estructural del pavimento puede manifestarse con daños de este tipo debido a una deficiencia de diseño, la cual se manifiesta cuando la vía está sometida a cargas de tránsito muy altas.

Niveles de severidad y evaluación.

- Bajo (3 puntos): profundidad < a 5 mm.
- Medio (9 puntos): profundidad de 5 a 15 mm.
- Alto (27 puntos): profundidad de 15 a 25 mm.
- Muy alto (81 puntos): profundidad > a 25 mm.

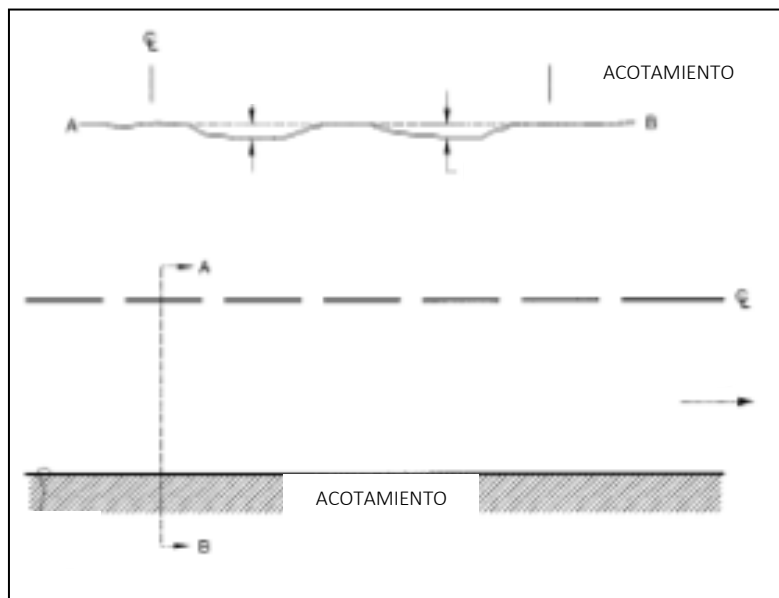


Figura 4.12 Ahuellamiento (roderas). (FHWA, 2003)

4.1.1.5.7 Baches.

Desintegración total de la carpeta asfáltica que deja expuestos los materiales granulares lo cual lleva al aumento del área afectada y el aumento de la profundidad debido a la acción del tránsito. Existen baches de forma redondeada y profundidad variable, con bordes bien definidos que resultan de una deficiencia localizada en las capas estructurales (Figura 4.13).

Posibles causas. Puede presentarse por la retención de agua en zonas fisuradas que ante la acción del tránsito produce reducción de esfuerzos efectivos generando deformaciones y la falla del pavimento. Este deterioro ocurre siempre como evolución de otros daños, especialmente la piel de cocodrilo.

También es consecuencia de algunos defectos constructivos (por ejemplo: la carencia de penetración de la imprimación en bases granulares) o de una deficiencia de espesores de capas estructurales. Puede producirse también en zonas donde el pavimento o la subrasante son débiles.

Niveles de severidad y evaluación.

- Bajo (3 puntos): profundidad de afectación < 10 mm, sin desprendimientos superficiales.
- Medio (9 puntos): profundidad de 10 a 25 mm, corresponde al desprendimiento de tratamientos superficiales o capas delgadas.
- Alto (27 puntos): profundidad de afectación de 25 a 50 mm, deja expuesta la base.
- Muy Alto (81 puntos): profundidad de afectación > a 50 mm, llegando a afectar la base granular.

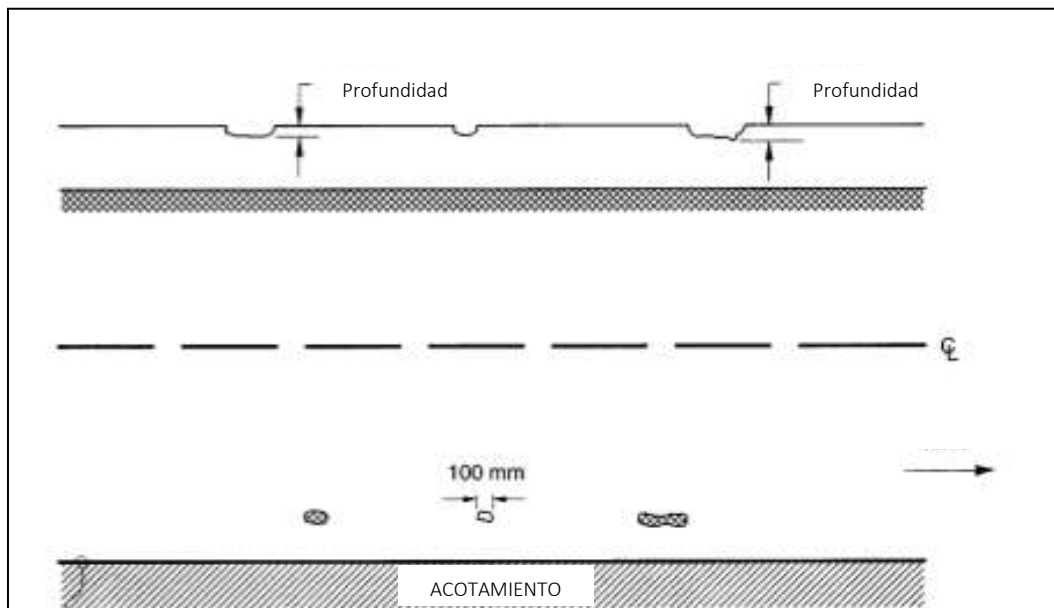


Figura 4.13 Baches. (FHWA, 2003)

5 Evaluación del tramo en estudio.

5.1 Generalidades.

La autopista Maravatio-Zapotlanejo tiene una longitud de 309.6 km. Inicia en el municipio de Maravatio, Michoacán (localizado a una latitud 19° 54' N y una altitud de 2020 msnm) y termina en el municipio de Zapotlanejo, Jalisco (latitud 20° 37' N y altitud de 1520 msnm). Está pasa por cuatro cabeceras municipales importantes para la economía de la región, tres pertenecientes al estado de Michoacán (Zinapécuaro, Panindicuaró y Ecuandureo) y una a Jalisco (Ocotlán). Ver Figura 5.1.

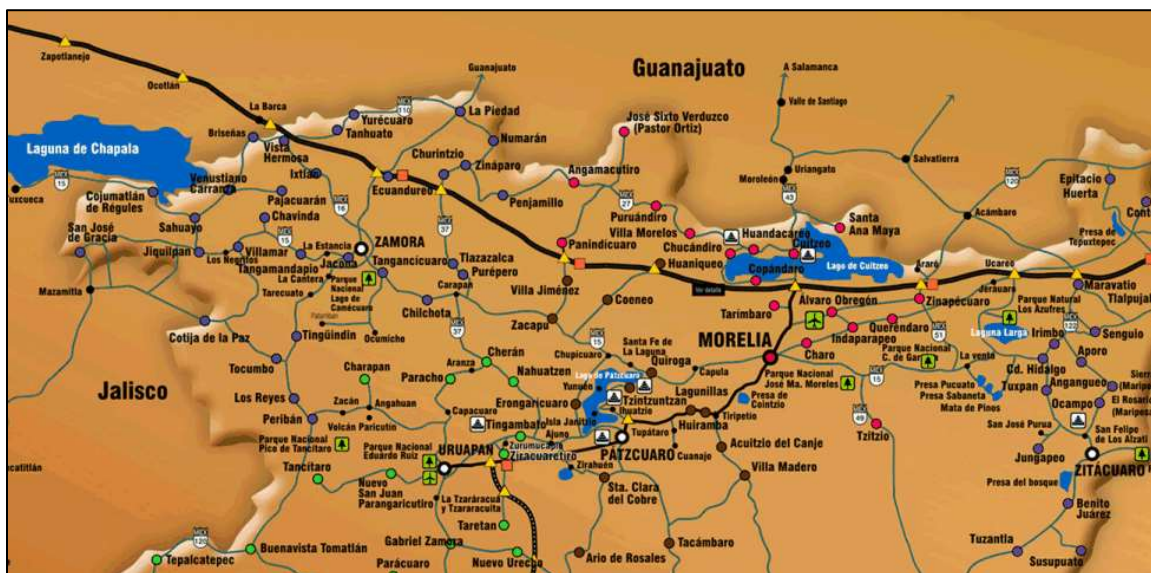


Figura 5.1 Autopista Maravatio-Zapotlanejo (www.zacapumuch.com.mx)

Tres grandes sistemas hidrográficos encierran a la autopista: los afluentes del río Lerma (con una longitud de 708 km. y desemboca en el Lago Chapala), la cuenca del Lago Cuitzeo (con 3977 km², cruzado por la carretera Federal No. 43 y la autopista de cuota Morelia-Salamanca) y el Lago Chapala (embalse natural con 1112 km²).

La región tiene una precipitación media anual de 876 mm. Por otra parte, la temperatura promedio anual es de 22.2°C, teniendo como extremos temperaturas mínimas anuales de 14.7°C y de 29.6 C. El clima predominante es templado sub-húmedo.

El tipo de vegetación predominante en el tramo esta descrito en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Tipo de vegetación en la Autopista Maravatio-Zapotlanejo
(<http://es.wikipedia.org/>)

TIPO DE VEGETACIÓN	PORCENTAJE
Agrícola	27.99 %
Pastizales	1.80 %
Bosques	26.68 %
Selva	34.78 %
Matorrales	5.08 %
Otros	1.66 %

Respecto a su orografía, está conformada por zonas semiplanas, zonas planas y zonas accidentadas, estas últimas alcanzan alturas de 1,900 metros sobre el nivel del mar. (<http://www.inegi.org.mx>).

5.2 Selección de la muestra.

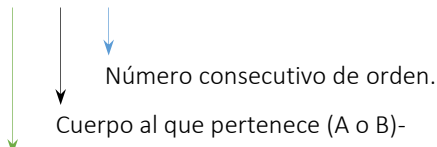
La muestra para esta investigación la constituye la totalidad de terraplenes en el tramo carretero Maravatío-Zapotlanejo que presenten evidencia de un problema de inestabilidad. Los puntos de riesgo de inestabilidad de estos terraplenes se observaron e identificaron en la inspección previa de campo, con la finalidad de obtener una muestra probabilística representativa para su evaluación.

El número de terraplenes que reúnen estas características son 40 en total, distribuidos en tres tramos carreteros: Maravatío-Panindícuaro (26), Panindícuaro-Ecuandureo (4) y Ecuandureo-Ocotlán-Zinapécuaro (10).

5.3 Codificación.

Codificar los datos significa asignarles un valor numérico o símbolo que los represente para tener una descripción más completa de éstos. Es decir, al momento de evaluar los terraplenes en campo tener una descripción de ellos sobre el tramo carretero y cuerpo que pertenecen; agregándole el kilómetro de su ubicación. Un ejemplo sería:

T1 A 01



T1= Tramo carretero Maravatío -Panindícuaro.

T2= Tramo carretero Panindícuaro-Ecuandureo.

T3= Tramo carretero Ecuandureo-Ocotlán-Zinapécuaro.

Por lo que la codificación para su evaluación está representada en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Codificación para evaluación de los terraplenes

CODIGO IDENTIFICACION	KM. INICIO	KM. TERMINO	CODIGO IDENTIFICACION	KM. INICIO	KM. TERMINO
T1A01	167+180	167+260	T1A21	261+280	261+480
T1A02	169+240	169+860	T1A22	262+000	262+150
T1A03	172+100	172+620	T1A23	291+900	292+050
T1A04	173+880	173+950	T1B24	291+900	292+050
T1B05	176+140	176+600	T1A25	293+900	294+250
T1A06	176+380	176+786	T1B26	293+900	294+250
T1A07	177+800	178+040	T2A27	305+495	305+590
T1A08	190+240	190+600	T2B28	305+495	305+590
T1A09	191+100	191+250	T2A29	314+000	314+345
T1A10	196+280	196+400	T2B30	314+000	314+345
T1A11	197+520	197+800	T3A31	374+400	374+550
T1A12	198+400	198+560	T3B32	374+400	374+550
T1A13	199+700	200+000	T3A33	375+750	377+550
T1A14	232+800	234+380	T3B34	375+750	377+550
T1A15	242+500	242+800	T3A35	380+350	380+600
T1B16	242+500	242+800	T3B36	380+350	380+600
T1A17	249+060	249+500	T3A37	428+450	428+600
T1A18	251+440	252+000	T3B38	428+450	428+600
T1A19	254+300	254+650	T3A39	430+650	430+900
T1B20	257+820	258+500	T3B40	430+650	430+900

5.4 CLASIFICACIÓN DE DATOS MEDIANTE LA EVALUACIÓN CON ESTADÍSTICA MULTIVARIANTE (CLÚSTER) Y USO DEL SPSS.

El término análisis clúster se utiliza para definir una serie de técnicas, fundamentalmente algoritmos, que tienen por objeto la búsqueda de grupos similares de terraplenes o de variables que se van agrupando en conglomerados. Dada una muestra de terraplenes, de cada uno de los cuales se dispone de una serie de observaciones, el análisis clúster sirve para clasificarlos en grupos lo más homogéneos posible en base a los factores (variables) observados. Los

terraplenes que queden clasificados en el mismo grupo serán tan similares como sea posible.

El análisis clúster es un método estadístico multivariante de clasificación automática de datos. A partir de una tabla de casos-variables, trata de situar los casos (terraplenes) en grupos homogéneos, conglomerados o clusters, no conocidos de antemano pero sugeridos por la propia esencia de los datos, de manera que terraplenes que puedan ser considerados similares sean asignados a un mismo clúster, mientras que terraplenes diferentes (disimilares) se localicen en clusters distintos. El análisis clúster define grupos distintos como sea posible en función de los propios datos.

Divide las observaciones en grupos basándose en la proximidad o lejanía de unas cosas con otras, por lo tanto es esencial el uso adecuado del concepto de distancia. Las observaciones muy cercanas deben de caer dentro del mismo cluster y las muy lejanas deben de caer en cluster diferentes, de modo que las observaciones dentro de un cluster sean homogéneas y lo más diferentes posibles de las contenidas en otros clusters.

De las dos grandes categorías en las que se suelen estructurar estos métodos (jerárquicos y no jerárquicos), el procedimiento que se va a seguir en esta evaluación es el aglomerativo jerárquico:

- Es aglomerativo porque a partir de las observaciones éstas se van agrupando de forma progresiva en grupos o clusters cada vez mayores. El análisis empieza con tantos conglomerados como casos y finaliza con la agrupación en un solo conglomerado de todas las unidades de análisis (Figura 5.2).

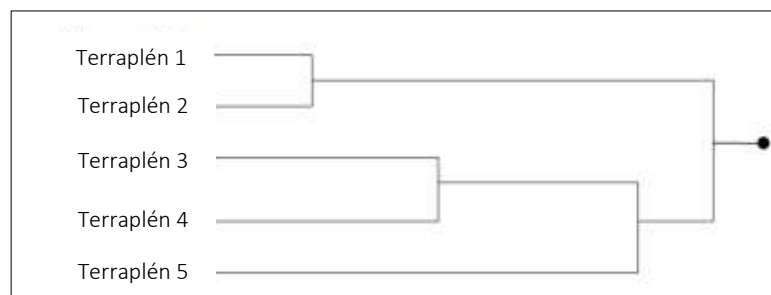


Figura 5.2 Diagrama representativo del método jerárquico aglomerativo (Pérez, 2004)

- Por último, los grupos que se obtienen son jerárquicos porque cada nueva fusión se va ampliando conforme decrece la similitud entre los mismos. Esto es, a partir de la matriz de datos originales se van formando nuevos conglomerados de forma ascendente agrupando, en cada etapa, a las unidades de los conglomerados más próximos. Las técnicas jerárquicas se aplican fundamentalmente cuando el número de las unidades de análisis es menor a 120.

Antes de empezar el desarrollo del análisis de cluster debemos tener en cuenta las siguientes consideraciones relativas a la selección de las variables:

- Esta técnica de análisis se puede aplicar sobre variables con cualquier nivel de medida aunque, es conveniente, que éste sea el mismo para todas ellas.
- Del mismo modo, las variables seleccionadas deben tener la misma escala pues, de lo contrario, los resultados pueden verse afectados. Si las variables no tienen la misma escala aquella que tenga mayor rango tendrá mayor peso en la medida de semejanza y/o distancia que seleccionemos para establecer los grupos.

Para nuestro caso, por ser variables cualitativas, y en general para datos binarios (o dicotómicos) procedemos a la estandarización previa de las variables cuyos valores reflejen la presencia o ausencia de la característica medida. Generalmente, la presencia de la característica (puntuaciones de 3, 9, 27 o 81) se codifica con el valor 1 y la ausencia con el valor 0. Partiendo de una tabla de frecuencias de 2x2 (Tabla 5.3) obtenemos la medida de proximidad o similitud en la que representa el número de elementos de la población en los que se constata la presencia o ausencia del factor en estudio.

Tabla 5.3 Tabla de frecuencias (Pérez, 2004).

Variable 1 → Variable 2 ↓	Presencia	Ausencia
Presencia	a	b
Ausencia	c	d

Las principales medidas son las siguientes:

$$\text{Russel y Rao } RR_{xy} = \frac{a}{a+b+c}$$

$$\text{Parejas Simples } PS_{xy} = \frac{a+d}{a+b+c+d}$$

$$\text{Jaccard } J_{xy} = \frac{a}{a+b+c}$$

$$\text{Dice y Sorensen } D_{xy} = \frac{2a}{2a+b+c}$$

$$\text{Sokal y Sneath } SS_{xy} = \frac{2(a+d)}{2(a+d)+b+c}$$

$$\text{Rogers y Tanimoto } RT_{xy} = \frac{a+d}{a+d+2(b+c)}$$

$$\text{Sokal y Sneath (2) } SS2_{xy} = \frac{a}{a+2(b+c)}$$

$$\text{Kulczynski } K_{xy} = \frac{a}{b+c}$$

La Tabla 5.3, a se refiere al número de casos que comparten la presencia de ambas características, d se refiere al número de casos que comparten la ausencia de ambas características (a y d son las concordancias), y b y c se refieren al número de casos que presentan una característica y no la otra (las discordancias). Obtenemos así, la matriz inicial de datos o también llamada matriz de similaridad o distancia (Tabla 5.4 y Tabla 5.5), que por sus dimensiones es segmentada en dos partes.

Los resultados pueden verse alterados cuando el número de variables con las que trabajamos es muy elevado. Cuantas más variables seleccionadas, no solo más complicado es el proceso sino que también más posibilidades de que existan variables relacionadas, es decir, que midan la misma característica o una muy semejante. En estos casos conviene aplicar, como paso previo, una técnica reduccionista, simplificando el número de variables a sólo aquellas que estén intercorrelacionadas. La clasificación definitiva se efectuará en base a los factores arrojados.

Una vez determinada la matriz inicial de datos (constituida por un conjunto mínimo de variables significativas, no correlacionadas y medidas en la misma unidad y escala), podemos cuantificar la proximidad o similitud que presentan las unidades de análisis respecto a los valores que en cada una de ellas toman dichas variables (o factores).

La proximidad expresa la semejanza que existe entre individuos o variables. Es decir, es el grado de asociación que existe entre ellos. Las proximidades pueden medir la distancia o la similitud (similaridad) entre los factores presentes en cada terraplén. El valor que se obtiene en una medida de distancia es tanto mayor cuanto más próximos están los elementos considerados. Dado el número elevado de casos y con la finalidad de agilizar los cálculos se ha aplicado la distancia euclídea (ésta es la opción que aparece por defecto en el SPSS cuando las variables tienen un nivel de medida de intervalo), que se define como:

$$d(A, B) = \sqrt{\sum_i (A_i - B_i)^2}$$

A partir de la matriz de similaridad o distancias que se genera deberemos elegir, de entre todos los posibles, un algoritmo con el cual poder formar los grupos entre los terraplenes evaluados. Cada uno de ellos con sus ventajas e inconvenientes que, en definitiva, serán mejores o peores según las características que tengamos en la muestra de terraplenes estudiados y, sobre todo, de la relevancia o interpretabilidad de los grupos obtenidos.

Tabla 5.4 Matriz de similitud o distancia (1/2)

Caso	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,00	12.000	5.000	14.000	15.000	21.000	14.000	18.000	15.000	12.000	21.000	19.000	12.000	22.000	13.000	16.000	14.000	22.000	21.000	17.000
2	12.000	0,00	11.000	14.000	11.000	19.000	16.000	14.000	15.000	16.000	15.000	19.000	16.000	16.000	9.000	10.000	14.000	20.000	15.000	17.000
3	5.000	11.000	0,00	11.000	12.000	20.000	11.000	19.000	12.000	11.000	16.000	20.000	13.000	19.000	12.000	15.000	15.000	23.000	22.000	18.000
4	14.000	14.000	11.000	0,00	11.000	11.000	12.000	16.000	15.000	12.000	19.000	23.000	8.000	16.000	13.000	16.000	12.000	18.000	13.000	11.000
5	15.000	11.000	12.000	11.000	0,00	18.000	13.000	11.000	10.000	9.000	10.000	22.000	7.000	15.000	8.000	11.000	13.000	21.000	16.000	12.000
6	21.000	19.000	20.000	11.000	18.000	0,00	19.000	15.000	18.000	15.000	18.000	26.000	17.000	17.000	16.000	17.000	15.000	17.000	16.000	14.000
7	14.000	16.000	11.000	12.000	13.000	18.000	0,00	18.000	15.000	8.000	21.000	19.000	16.000	14.000	15.000	18.000	16.000	26.000	23.000	17.000
8	18.000	14.000	19.000	16.000	11.000	15.000	18.000	0,00	13.000	16.000	11.000	19.000	16.000	14.000	15.000	16.000	18.000	20.000	11.000	15.000
9	15.000	15.000	12.000	15.000	10.000	18.000	15.000	13.000	0,00	15.000	12.000	18.000	11.000	17.000	12.000	15.000	15.000	23.000	20.000	16.000
10	16.000	16.000	11.000	12.000	9.000	15.000	8.000	19.000	15.000	0,00	19.000	19.000	14.000	20.000	15.000	18.000	14.000	24.000	21.000	15.000
11	21.000	15.000	16.000	19.000	10.000	18.000	21.000	11.000	12.000	19.000	0,00	20.000	17.000	17.000	14.000	13.000	19.000	21.000	14.000	20.000
12	19.000	19.000	20.000	23.000	22.000	26.000	19.000	19.000	18.000	19.000	20.000	0,00	21.000	27.000	22.000	25.000	19.000	27.000	22.000	20.000
13	12.000	16.000	13.000	8.000	7.000	17.000	16.000	16.000	11.000	14.000	17.000	21.000	0,00	20.000	9.000	12.000	8.000	16.000	13.000	9.000
14	22.000	16.000	19.000	16.000	15.000	17.000	14.000	14.000	17.000	20.000	17.000	27.000	20.000	0,00	17.000	18.000	20.000	24.000	17.000	19.000
15	13.000	9.000	12.000	13.000	8.000	16.000	15.000	15.000	12.000	15.000	14.000	22.000	9.000	17.000	0,00	3.000	7.000	13.000	14.000	10.000
16	16.000	10.000	15.000	16.000	11.000	17.000	18.000	16.000	15.000	18.000	13.000	25.000	12.000	18.000	3.000	0,00	10.000	12.000	13.000	13.000
17	14.000	14.000	15.000	12.000	13.000	15.000	16.000	18.000	15.000	14.000	19.000	19.000	8.000	20.000	7.000	10.000	0,00	12.000	15.000	9.000
18	22.000	20.000	23.000	18.000	21.000	17.000	26.000	20.000	23.000	24.000	21.000	27.000	16.000	24.000	13.000	12.000	12.000	0,00	15.000	15.000
19	21.000	15.000	22.000	13.000	16.000	16.000	23.000	11.000	20.000	21.000	14.000	22.000	13.000	17.000	14.000	13.000	15.000	15.000	0,00	14.000
20	17.000	17.000	18.000	11.000	12.000	14.000	17.000	15.000	16.000	15.000	20.000	20.000	9.000	19.000	10.000	13.000	9.000	15.000	14.000	0,00
21	19.000	17.000	22.000	17.000	16.000	18.000	21.000	15.000	18.000	19.000	18.000	20.000	15.000	19.000	14.000	17.000	15.000	21.000	12.000	14.000
22	22.000	20.000	25.000	22.000	21.000	17.000	26.000	18.000	21.000	22.000	23.000	23.000	20.000	20.000	17.000	18.000	18.000	20.000	17.000	13.000
23	17.000	21.000	18.000	19.000	22.000	20.000	21.000	23.000	18.000	21.000	22.000	20.000	19.000	25.000	16.000	19.000	21.000	21.000	22.000	16.000
24	21.000	15.000	24.000	23.000	24.000	18.000	23.000	19.000	20.000	25.000	20.000	18.000	21.000	21.000	18.000	17.000	17.000	21.000	14.000	20.000
25	18.000	16.000	17.000	18.000	13.000	13.000	20.000	14.000	11.000	20.000	11.000	15.000	12.000	22.000	9.000	12.000	12.000	16.000	13.000	9.000
26	23.000	19.000	22.000	21.000	18.000	12.000	25.000	15.000	16.000	23.000	12.000	18.000	17.000	19.000	12.000	13.000	15.000	15.000	12.000	12.000
27	12.000	10.000	13.000	16.000	13.000	23.000	18.000	16.000	13.000	18.000	15.000	17.000	12.000	16.000	9.000	12.000	14.000	20.000	15.000	17.000
28	20.000	16.000	21.000	20.000	15.000	21.000	20.000	12.000	17.000	20.000	13.000	21.000	16.000	14.000	13.000	14.000	20.000	20.000	11.000	19.000
29	21.000	21.000	22.000	19.000	10.000	20.000	15.000	19.000	16.000	17.000	20.000	22.000	11.000	17.000	12.000	15.000	15.000	21.000	20.000	10.000
30	25.000	21.000	26.000	25.000	22.000	24.000	27.000	17.000	26.000	29.000	20.000	24.000	21.000	21.000	18.000	17.000	23.000	19.000	18.000	18.000
31	17.000	19.000	14.000	13.000	14.000	20.000	13.000	21.000	14.000	17.000	20.000	22.000	15.000	19.000	16.000	19.000	17.000	25.000	26.000	16.000
32	19.000	15.000	18.000	13.000	14.000	18.000	17.000	19.000	12.000	19.000	22.000	24.000	11.000	19.000	14.000	15.000	15.000	21.000	20.000	16.000
33	22.000	28.000	21.000	20.000	23.000	27.000	20.000	26.000	27.000	22.000	20.000	25.000	20.000	22.000	23.000	20.000	26.000	24.000	21.000	23.000
34	19.000	29.000	18.000	19.000	20.000	30.000	17.000	27.000	24.000	19.000	24.000	22.000	17.000	25.000	22.000	23.000	23.000	25.000	26.000	20.000
35	22.000	20.000	19.000	16.000	17.000	19.000	18.000	20.000	15.000	18.000	23.000	23.000	18.000	22.000	17.000	18.000	20.000	24.000	23.000	21.000
36	26.000	22.000	23.000	18.000	15.000	19.000	18.000	18.000	15.000	18.000	21.000	21.000	16.000	18.000	17.000	20.000	18.000	22.000	23.000	17.000
37	20.000	18.000	19.000	18.000	17.000	17.000	20.000	14.000	17.000	18.000	13.000	21.000	20.000	18.000	17.000	13.000	15.000	20.000	17.000	19.000
38	21.000	15.000	18.000	13.000	16.000	18.000	19.000	19.000	12.000	21.000	16.000	20.000	13.000	19.000	14.000	13.000	15.000	17.000	13.000	18.000
39	23.000	25.000	26.000	17.000	20.000	20.000	21.000	17.000	22.000	23.000	26.000	24.000	15.000	19.000	18.000	19.000	17.000	17.000	18.000	12.000
40	15.000	19.000	18.000	17.000	18.000	22.000	21.000	19.000	20.000	21.000	24.000	20.000	15.000	23.000	14.000	15.000	15.000	17.000	18.000	14.000

Tabla 5.5 Matriz de similitud o distancia (2/2)

21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
19.000	22.000	17.000	21.000	16.000	23.000	12.000	20.000	21.000	25.000	17.000	19.000	22.000	19.000	22.000	26.000	20.000	21.000	23.000	15.000
17.000	20.000	21.000	15.000	16.000	19.000	10.000	16.000	21.000	21.000	21.000	15.000	28.000	28.000	20.000	22.000	16.000	15.000	25.000	19.000
22.000	25.000	18.000	24.000	17.000	22.000	13.000	21.000	22.000	26.000	14.000	18.000	21.000	18.000	19.000	23.000	19.000	18.000	26.000	18.000
17.000	22.000	19.000	23.000	18.000	21.000	16.000	20.000	19.000	25.000	13.000	13.000	20.000	19.000	16.000	18.000	18.000	13.000	17.000	17.000
18.000	22.000	21.000	24.000	13.000	18.000	13.000	15.000	10.000	22.000	14.000	14.000	23.000	20.000	17.000	15.000	17.000	16.000	20.000	18.000
18.000	17.000	20.000	18.000	17.000	12.000	23.000	21.000	20.000	24.000	20.000	20.000	18.000	27.000	19.000	19.000	17.000	18.000	20.000	22.000
21.000	26.000	21.000	23.000	20.000	25.000	18.000	20.000	15.000	27.000	13.000	17.000	20.000	17.000	16.000	18.000	20.000	19.000	21.000	21.000
15.000	18.000	23.000	19.000	14.000	15.000	16.000	12.000	19.000	19.000	21.000	19.000	28.000	27.000	20.000	18.000	14.000	19.000	17.000	19.000
18.000	21.000	18.000	20.000	11.000	16.000	13.000	17.000	16.000	26.000	14.000	12.000	12.000	24.000	15.000	15.000	17.000	22.000	23.000	20.000
19.000	22.000	21.000	23.000	20.000	23.000	18.000	20.000	17.000	29.000	17.000	19.000	22.000	19.000	18.000	18.000	18.000	21.000	23.000	21.000
18.000	23.000	22.000	20.000	11.000	12.000	15.000	13.000	20.000	20.000	20.000	22.000	23.000	24.000	23.000	21.000	13.000	16.000	26.000	24.000
20.000	23.000	20.000	18.000	15.000	16.000	17.000	21.000	22.000	24.000	22.000	22.000	24.000	25.000	23.000	21.000	21.000	20.000	24.000	20.000
15.000	20.000	19.000	21.000	12.000	17.000	12.000	16.000	11.000	21.000	15.000	11.000	20.000	17.000	18.000	16.000	20.000	13.000	15.000	15.000
19.000	20.000	25.000	21.000	22.000	19.000	16.000	14.000	17.000	21.000	19.000	19.000	22.000	25.000	22.000	18.000	18.000	19.000	19.000	23.000
17.000	17.000	16.000	18.000	9.000	12.000	9.000	13.000	12.000	18.000	16.000	14.000	23.000	22.000	17.000	17.000	17.000	14.000	18.000	14.000
17.000	18.000	19.000	17.000	12.000	13.000	12.000	14.000	15.000	17.000	19.000	19.000	20.000	23.000	18.000	20.000	18.000	13.000	19.000	15.000
15.000	18.000	21.000	17.000	12.000	15.000	14.000	20.000	15.000	23.000	17.000	15.000	26.000	23.000	20.000	18.000	20.000	15.000	17.000	15.000
21.000	20.000	21.000	21.000	16.000	15.000	20.000	20.000	21.000	19.000	25.000	21.000	24.000	25.000	24.000	22.000	22.000	17.000	17.000	17.000
12.000	17.000	22.000	14.000	13.000	12.000	15.000	11.000	20.000	18.000	26.000	20.000	21.000	26.000	23.000	23.000	13.000	18.000	18.000	18.000
14.000	13.000	16.000	20.000	9.000	12.000	17.000	19.000	10.000	18.000	16.000	16.000	23.000	20.000	21.000	17.000	19.000	18.000	12.000	14.000
13.000	13.000	19.000	20.000	13.000	14.000	13.000	15.000	16.000	22.000	22.000	18.000	27.000	25.000	19.000	19.000	20.000	22.000	14.000	18.000
22.000	19.000	18.000	18.000	11.000	14.000	15.000	19.000	18.000	20.000	16.000	20.000	19.000	18.000	19.000	23.000	19.000	14.000	24.000	20.000
20.000	17.000	18.000	17.000	17.000	14.000	15.000	17.000	24.000	20.000	26.000	26.000	25.000	30.000	23.000	23.000	19.000	16.000	24.000	22.000
13.000	14.000	11.000	17.000	5.000	5.000	12.000	14.000	11.000	15.000	17.000	19.000	24.000	21.000	18.000	18.000	16.000	15.000	19.000	17.000
14.000	13.000	14.000	14.000	5.000	5.000	15.000	11.000	16.000	14.000	22.000	22.000	23.000	26.000	21.000	17.000	17.000	18.000	20.000	20.000
13.000	14.000	15.000	15.000	12.000	15.000	10.000	10.000	17.000	17.000	15.000	13.000	22.000	21.000	16.000	18.000	16.000	13.000	21.000	19.000
15.000	20.000	19.000	17.000	14.000	11.000	10.000	17.000	13.000	13.000	19.000	17.000	18.000	21.000	22.000	18.000	16.000	19.000	21.000	25.000
16.000	17.000	18.000	24.000	11.000	16.000	17.000	17.000	16.000	16.000	14.000	14.000	16.000	18.000	17.000	15.000	23.000	20.000	16.000	18.000
22.000	17.000	29.000	20.000	15.000	14.000	17.000	13.000	16.000	16.000	22.000	22.000	19.000	22.000	23.000	21.000	25.000	22.000	18.000	24.000
22.000	23.000	16.000	26.000	17.000	22.000	15.000	19.000	14.000	22.000	19.000	8.000	17.000	14.000	11.000	17.000	23.000	14.000	22.000	20.000
18.000	21.000	20.000	20.000	19.000	20.000	13.000	17.000	16.000	22.000	22.000	8.000	21.000	22.000	11.000	15.000	25.000	20.000	20.000	18.000
27.000	28.000	19.000	25.000	24.000	23.000	22.000	18.000	21.000	19.000	17.000	21.000	21.000	5.000	18.000	22.000	24.000	19.000	21.000	17.000
26.000	29.000	18.000	30.000	21.000	26.000	21.000	21.000	18.000	22.000	14.000	22.000	5.000	19.000	19.000	21.000	25.000	20.000	22.000	18.000
19.000	20.000	19.000	23.000	18.000	21.000	16.000	22.000	17.000	23.000	11.000	11.000	18.000	19.000	10.000	8.000	24.000	15.000	19.000	17.000
19.000	20.000	23.000	23.000	18.000	17.000	18.000	18.000	15.000	21.000	17.000	15.000	22.000	21.000	8.000	26.000	17.000	15.000	15.000	17.000
19.000	20.000	19.000	19.000	16.000	17.000	16.000	16.000	23.000	25.000	23.000	25.000	24.000	25.000	24.000	26.000	21.000	21.000	25.000	25.000
22.000	25.000	14.000	16.000	15.000	18.000	21.000	19.000	20.000	22.000	14.000	8.000	19.000	20.000	15.000	17.000	21.000	22.000	22.000	18.000
14.000	15.000	24.000	24.000	19.000	18.000	21.000	21.000	16.000	18.000	22.000	20.000	20.000	22.000	19.000	15.000	25.000	22.000	22.000	12.000
18.000	19.000	20.000	22.000	17.000	20.000	19.000	25.000	18.000	24.000	20.000	18.000	17.000	18.000	17.000	19.000	25.000	18.000	12.000	8.000

Dentro de las técnicas jerárquicas el algoritmo de clasificación que hemos aplicado ha sido el método de Ward o Enlace por mínima varianza (considera como distancia entre dos grupos el menor incremento de varianza residual global, o sea, si en un nivel dado existe un número de clusters de los que se deben elegir dos para una nueva fusión, se prueban todas las parejas posibles y se calcula la varianza residual global o intragrupos con cada pareja unida y todos los demás clusters. La pareja de grupos que produzca el mínimo incremento en esta varianza residual será la elegida para su unión en un nuevo nivel) debido a que utiliza más información sobre el contenido de los grupos que otros métodos y se ha demostrado una mayor eficacia en estudios de simulación. (César Pérez, 2004).

Siendo más precisos, en el método de Ward se calcula la media de todas las variables de cada cluster, luego se calcula la distancia euclídea al cuadrado entre cada terraplén y la media de su grupo y después se suman las distancias de todos los casos. En cada paso, los clusters que se forman son aquellos que resultan con el menor incremento en la suma total de las distancias al cuadrado intracluster. La métrica considerada es la euclídea, explicada anteriormente.

Una vez concluido el proceso de formación de conglomerados o grupos este método ofrece la posibilidad de seguir las distintas etapas de formación. La información detallada de lo que ha sucedido en cada una de ellas queda recogida en el historial de conglomeración. A partir de la solución obtenida en cada una de las etapas se decidirá el número de conglomerados que se forman.

No obstante, para facilitar esta decisión se plasma de forma gráfica la información contenida en el historial de conglomeración (Tabla 5.6). Uno de los gráficos que se identifican y servirá para identificar nuestros tres grupos es el dendograma. El cual, es el gráfico más representativo de este tipo de análisis, la cual asume la forma de un árbol de clasificación en el que es posible observar con toda claridad la forma y el número de los grupos que se van formando. En este gráfico es el eje de ordenadas el que adquiere verdadero protagonismo pues representa los distintos niveles de similitud en torno al cual se han ido agrupando las unidades de análisis en función de la medida elegida. Por su parte, en el eje de abscisas únicamente se identifican los casos u observaciones. El problema de esta representación gráfica, es que sólo se puede emplear cuando el número de casos es reducido ($n < 200$). Constituye un resumen de la información original presente en la matriz de distancias o similaridades y la información que presenta será más útil cuanto más agrupado sean los datos que represente.

Tabla 5.6 Historial de conglomeración (Software estadístico SPSS V19.0)

Etapa	Conglomerado que se combina		Coeficientes	Etapa en la que el conglomerado aparece por primera vez		Próxima etapa
	Conglomerad o 1	Conglomerad o 2		Conglomerad o 1	Conglomerad o 2	
1	15	16	.866	0	0	16
2	33	34	1.984	0	0	36
3	25	26	3.102	0	0	21
4	1	3	4.220	0	0	27
5	21	29	5.445	0	0	17
6	5	13	6.768	0	0	12
7	32	38	8.182	0	0	14
8	35	36	9.596	0	0	31
9	7	10	11.010	0	0	27
10	17	20	12.510	0	0	19
11	27	28	14.092	0	0	22
12	4	5	15.699	0	6	19
13	8	19	17.357	0	0	20
14	31	32	19.076	0	7	31
15	9	11	20.808	0	0	26
16	2	15	22.573	0	1	30
17	21	30	24.374	5	0	28
18	22	39	26.177	0	0	28
19	4	17	28.040	12	10	33
20	8	37	29.937	13	0	24
21	23	25	31.917	0	3	32
22	14	27	33.970	0	11	29
23	18	40	36.032	0	0	30
24	6	8	38.142	0	20	26
25	12	24	40.263	0	0	32
26	6	9	42.445	24	15	29
27	1	7	44.639	4	9	35
28	21	22	46.903	17	18	37
29	6	14	49.255	26	22	34
30	2	18	51.669	16	23	33
31	31	35	54.092	14	8	36
32	12	23	56.519	25	21	34
33	2	4	58.992	30	19	35
34	6	12	61.945	29	32	37
35	1	2	65.261	27	33	38
36	31	33	68.735	31	2	39
37	6	21	72.608	34	28	38
38	1	6	76.955	35	37	39
39	1	31	81.488	38	36	0

5.4.1 Elección de un criterio para decidir el número de conglomerados óptimo.

El principal inconveniente que se puede identificar en los métodos jerárquicos es que no hay criterio único que permita determinar cuántos grupos quedan una vez obtenidos los resultados.

Para tal fin, se enumera dos criterios en los que nos podemos apoyar. Ambos parten de la observación del dendograma:

1. Determinar un punto en la escala de distancias a partir del cual hemos decidido que se consigue el equilibrio entre el número de subáreas y el grado de homogeneidad interna requerido.
2. O bien, escoger los grupos que mantienen fuerte homogeneidad interna y cuya unión con otros grupos supone un gran salto en la escala de distancias y con ello una pérdida sensible de información específica del grupo.

Por último, no se debe olvidar que los grupos de conglomerados que se obtiene, se realiza a partir de aquellas variables que se consideran identificativas en la evaluación de los terraplenes y que, en consecuencia, las áreas homogéneas que se obtienen serán significativas debido a que los indicadores seleccionados son los más relevantes en la evaluación de cada terraplén.

Por ende, la decisión del número de conglomerados que se toma es en base a los tres grupos de riesgo que delimitaran el nivel de inestabilidad de todos los terraplenes analizados; por lo cual al cortar al dendograma en una distancia de agrupación de 22 unidades los obtenemos (Figura 5.3).

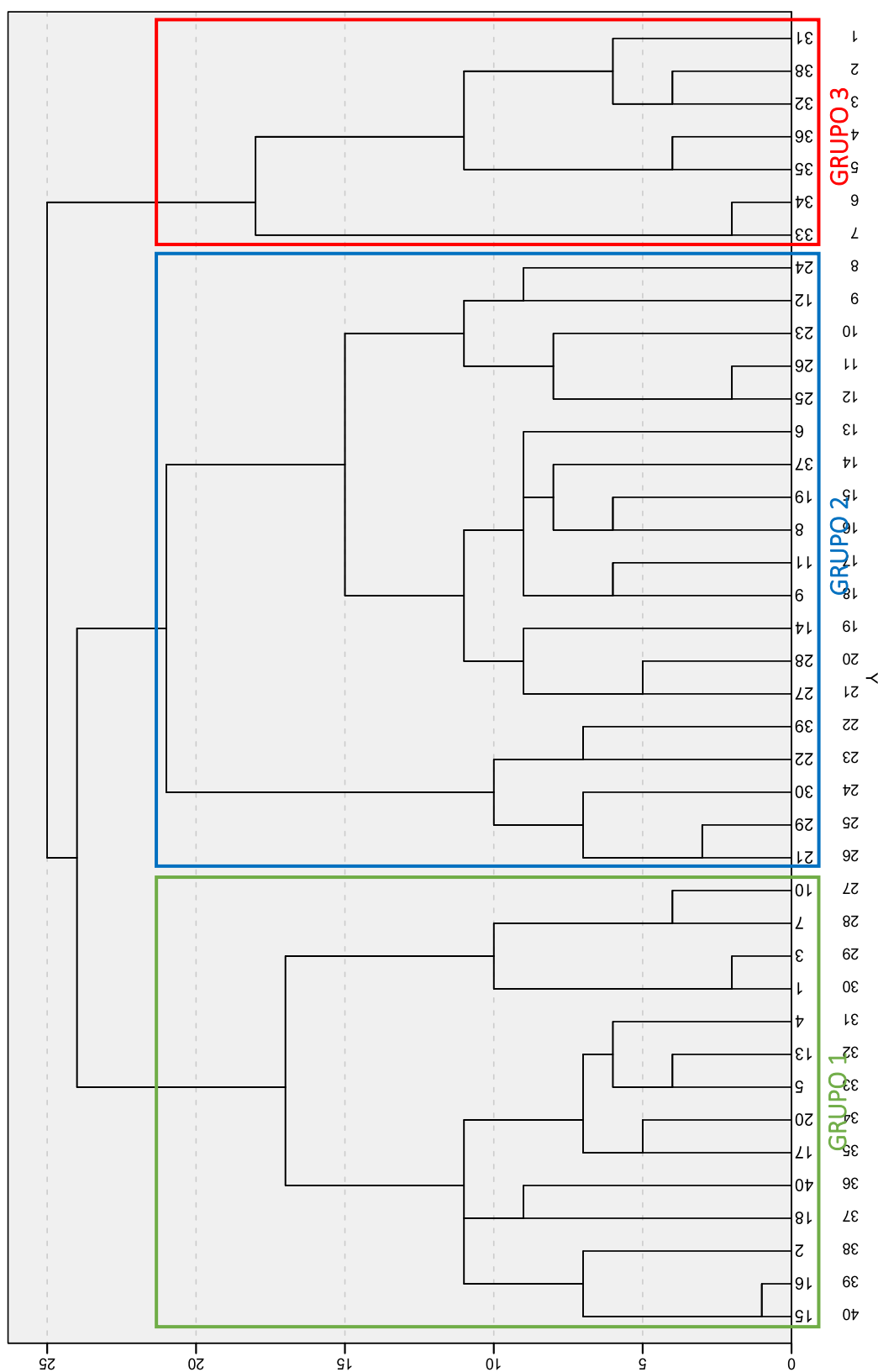


Figura 5.3 Diagrama de conglomerados del tramo en estudio (Software estadístico SPSS V19.0)

Los grupos resultantes son denominados con un nivel de inestabilidad: Bajo (grupo 1), Medio (grupo 2) y Alto (grupo 3). Los rangos que delimitan a estos grupos se proponen en primera instancia en base a la obtención de la media estadística de los valores del IGE_{TC} localizados en cada grupo. De los valores de las medias, se selecciona los que marcan un límite apropiado entre cada grupo

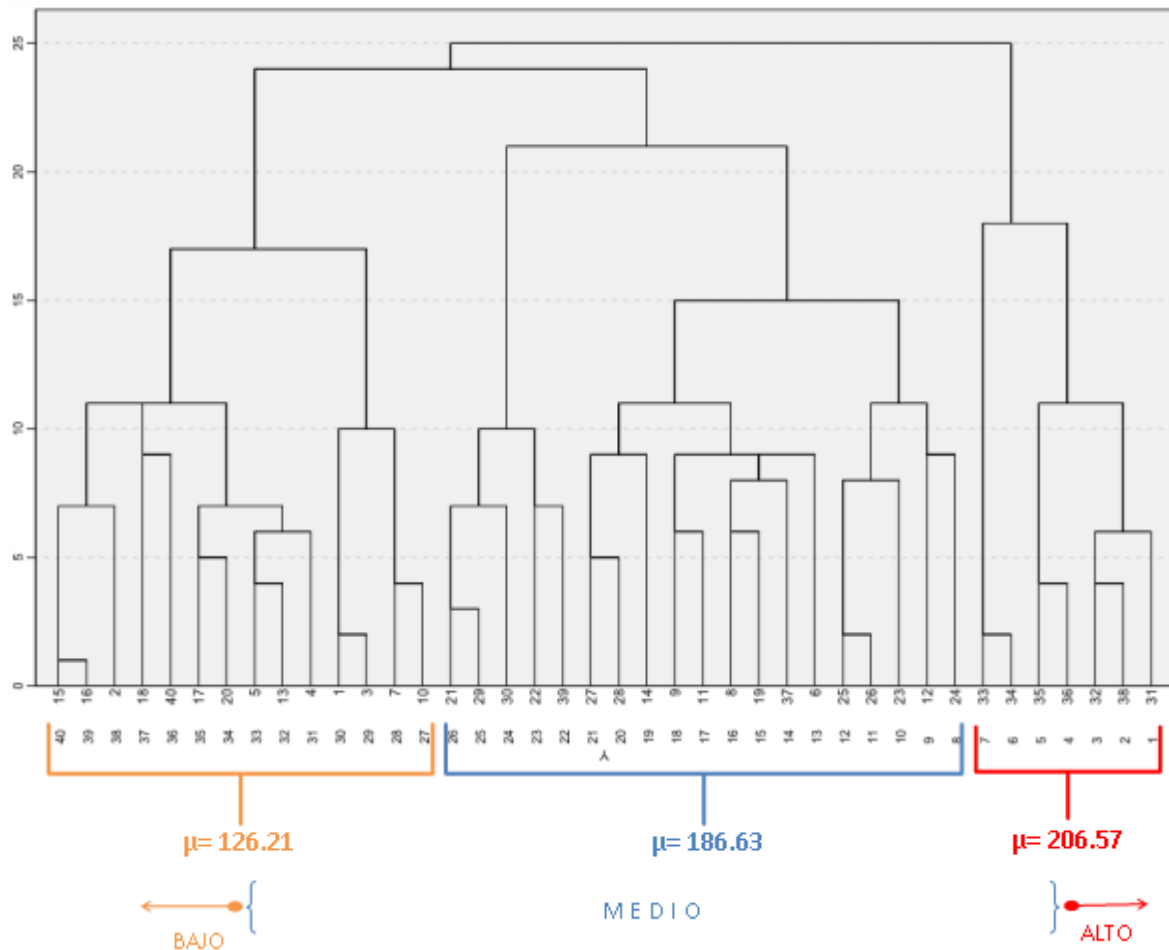


Figura 5.4 Valores medias de cada conglomerado (Software estadístico SPSS V19.0)

Analizando las medias de los conglomerados con los valores IGE_{TC} obtenidos en la evaluación, se considera que la media del grupo 3, la cual sirve para determinar el rango de puntuación es muy baja, lo que origina que terraplenes con un riesgo de inestabilidad medio sean clasificados en riesgo alto esto debido a la calificación que presenta. Debido a ello, se extrapola los datos y de esta manera determinar una nueva media para el grupo 3 ($\mu = 309.85$), la cual servirá como el parámetro para establecer así el nuevo rango de puntuación para un nivel de inestabilidad

alto. Obteniendo así los rangos de puntuación IGE_{TC} para cada nivel de inestabilidad que presenten los terraplenes carreteros a evaluar (Tabla 5.7).

Tabla 5.7 Rangos IGE_{TC}

NIVEL DE INESTABILIDAD	PUNTUACION IGE_{TC}
BAJO	< 150
MEDIO	150 – 300
ALTO	> 300

5.4.2 Uso del SPSS para el análisis cluster.

Una vez expuestos los aspectos metodológicos básicos a considerar en la técnica de cluster, la cual es aplicada en nuestro análisis; pasamos a relacionar la secuencia y pasos a seguir con el software estadístico SPSS versión 19.0, el cual es el que disponemos. El objetivo perseguido con el ejemplo, es para ver en forma sintetizada el manejo del programa y elaborar los cálculos estadísticos mediante este.

1^{ER}. PASO.

El análisis empieza seleccionado del menú Analizar la técnica en cuestión. Analizar: Clasificar: Conglomerados Jerárquicos (Figura 5.5). Partiendo de 40 unidades de análisis, los cuales pertenecen a la muestra representativa de los terraplenes que anteriormente describimos.

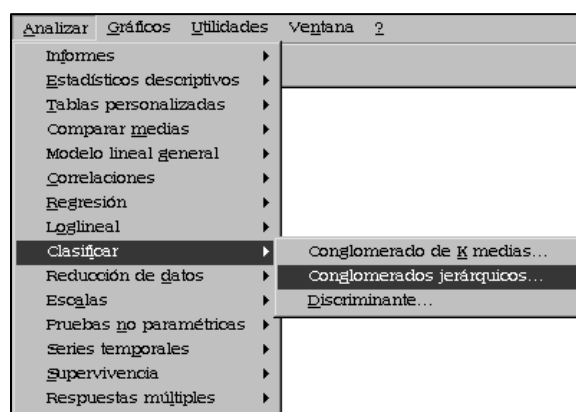


Figura 5.5 Menú Analizar software estadístico SPSS V19.0

2^º. PASO.

Una vez dentro del cuadro de diálogo del análisis de cluster, seleccionamos las variables y las unidades de análisis (Figura 5.6). Donde dice Variables,

introducimos las variables que nos van a permitir la ordenación y clasificación de los terraplenes seleccionados.



Figura 5.6 Análisis de cluster software estadístico SPSS V19.0

3ER. PASO.

Una vez seleccionadas las variables y las unidades solicitamos que el proceso de Conglomerar se realice por Casos. Así como también la Visualización en forma de estadísticos y gráficos.

Una vez señalados los requisitos básicos deberemos ir introduciendo las restricciones y peticiones que nos parezcan las más indicadas para el tipo de análisis que estamos desarrollando. Para ello deberemos acceder a los sub-cuadros de diálogos correspondientes.

4º. PASO.

Lo primero que debemos concretar es la medida de distancia que vamos a aplicar y el método de conglomeración. Dando click sobre el botón de comando Método, situado en la parte inferior del cuadro de diálogo principal, accedemos al sub-cuadro de diálogo Método (Figura 5.7). Ahí:

1. Dado que las variables seleccionadas son de medida de Intervalo seleccionamos de la ventana desplegable la opción que viene por defecto, esto es, Distancia euclídea.
2. En el mismo sub-cuadro seleccionamos el Método o algoritmo de clasificación y que en nuestro caso es el de Método de Word o Enlace por mínima varianza.
3. Por último, como las variables seleccionadas ya presentan la misma escala, esto a que fueron estandarizadas en base a los valores 0 y 1 (ausencia-presencia), la opción Transformar valores queda seleccionada como Ninguna.

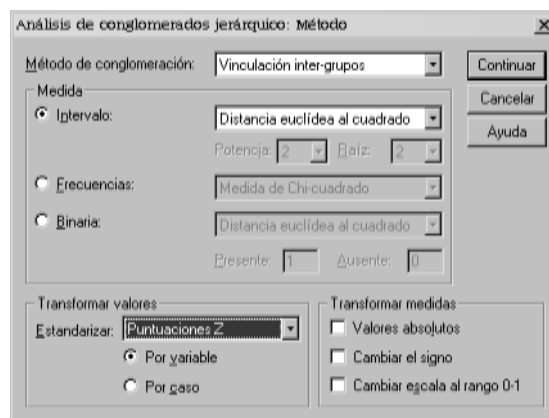


Figura 5.7 Menú Método Software estadístico SPSS V19.0

5º. PASO.

Dándole click en el botón de comando Estadísticos, situado en la parte inferior del cuadro de diálogo principal, accedemos al sub-cuadro que nos permite seleccionar (Figura 5.8):

- La Matriz de Distancias. Esta matriz define la distancia entre dos conglomerados como el promedio de las distancias entre todos los pares de individuos en los cuáles un miembro del par pertenece a cada uno de los clusters formados.
- El Historial de Conglomeración. Muestra los casos o conglomerados combinados en cada etapa, las distancias entre los casos o los conglomerados que se combinan (fusionan), así como el último nivel del proceso de aglomeración en el que cada caso (o variable) se unió (fusiono) a su conglomerado correspondiente.
- Conglomerado de pertenencia. Muestra el conglomerado al cual se asigna cada caso en una o varias etapas de la combinación de los conglomerados. Las opciones disponibles son: Ninguna, Solución única y Rango de soluciones. Como identificaremos los conglomerados en base a nuestro criterio, seleccionamos Ninguna para que nos arroje el cluster total.

Las técnicas jerárquicas, tanto en su forma aglomerativa como divisiva, permiten diferentes formas de representación gráfica que son de gran utilidad para la comprensión e interpretación del proceso de obtención de los distintos clusters que se han ido creando en relación con las diferentes medidas de similaridad y algoritmos de clasificación elegidos. A este respecto, entre las representaciones gráficas más comunes destacamos el gráfico de carámbanos o cicle plot y el dendrograma.

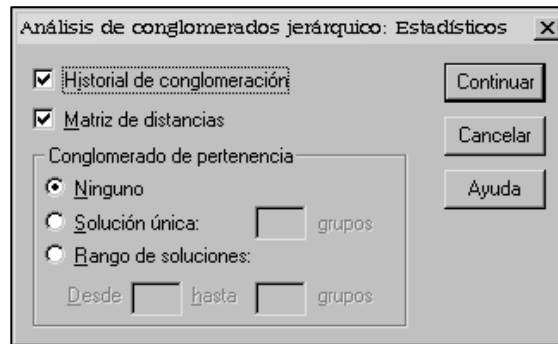


Figura 5.8 Menú Estadísticos software estadístico SPSS V19.0

6º. PASO.

Dentro del sub-cuadro de diálogo de Gráficos (Figura 5.9), seleccionamos la opción de Dendrograma (orientación vertical) y de esa forma obtendremos el gráfico representativo (dendrograma) del análisis de cluster.

Los dendrogramas pueden emplearse para evaluar la cohesión de los conglomerados que se han formado y proporcionar información sobre el número adecuado de conglomerados que deben conservarse. El dendrograma constituye la representación visual de los pasos de una solución de conglomeración jerárquica que muestra, para cada paso, los conglomerados que se combinan y los valores de los coeficientes de distancia. Las líneas verticales conectadas designan casos combinados (fusionados). El dendrograma re-escala las distancias reales a valores entre 0 y 25, preservando la razón de las distancias entre los pasos.

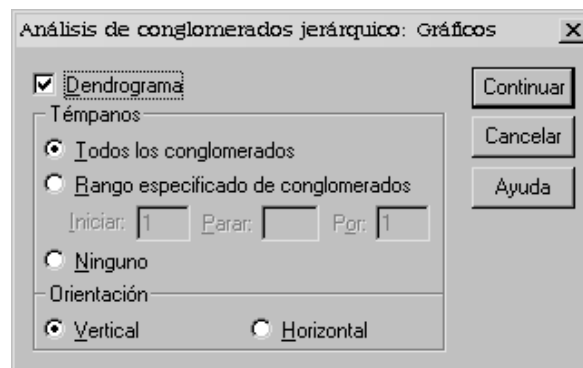


Figura 5.9 Menú Gráficos software estadístico SPSS V19.0

5.5 VALIDACIÓN ESTADÍSTICA.

Para que el análisis de conglomerados y la evaluación de los terraplenes carreteros tengan una validez, es necesario que los puntajes IGE_{TC} de cada grupo obtenido, así como el puntaje total de la unión de los grupos presenten una distribución normal. Las técnicas de estadística se utilizan para evaluar la razonabilidad de la clasificación de los rangos de peligro. Las distribuciones de las calificaciones o histogramas de los tres grupos de riesgo obtenidos, así como el grupo combinado de los tres; se comparan con la distribución normal de curvas. Con la ayuda del programa estadístico SPSS V19.0 se obtiene los histogramas antes mencionados (Figura 5.10).

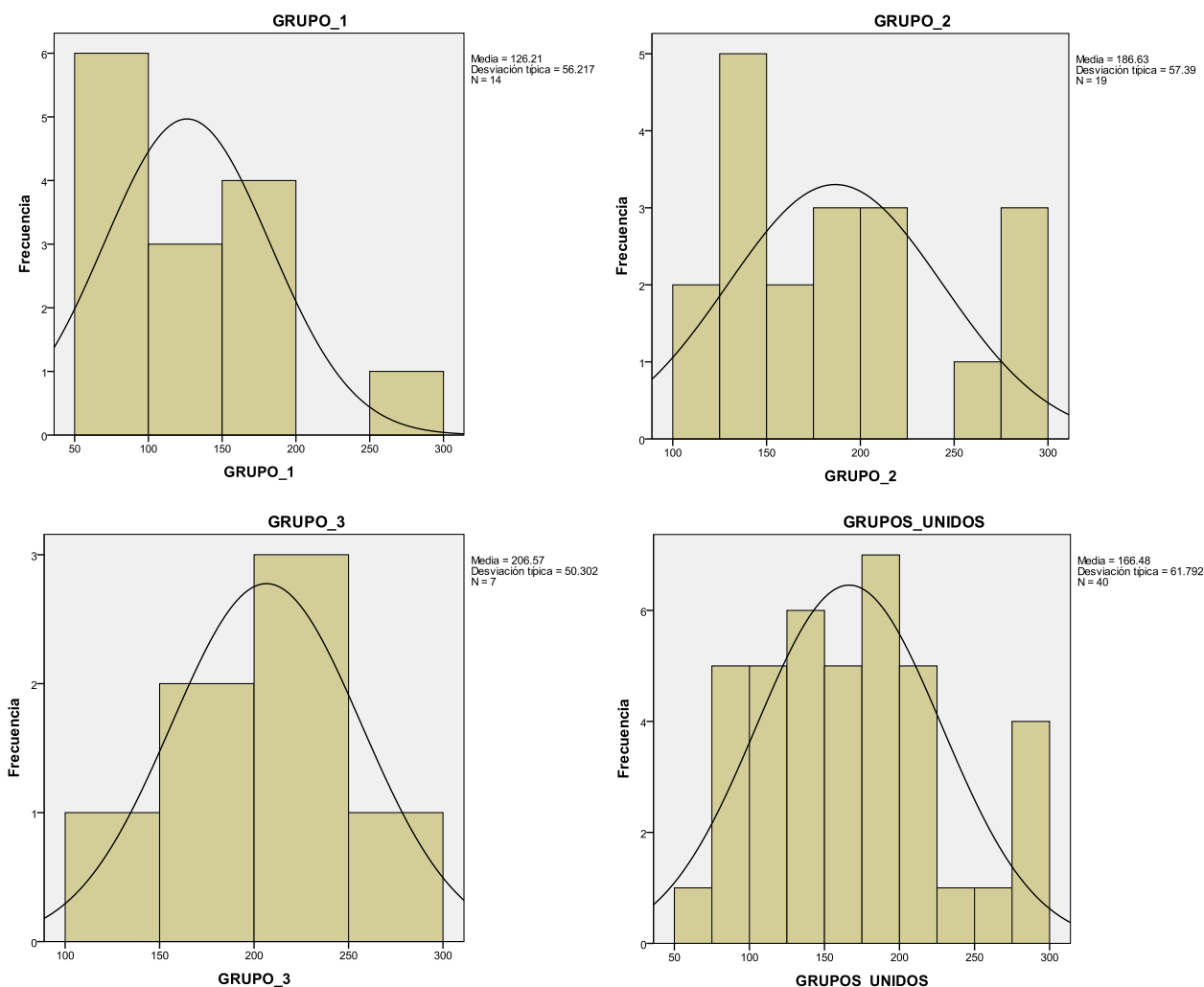


Figura 5.10 Histogramas de los grupos de riesgo. (software estadístico SPSS V19.0)

Gráficamente, de acuerdo a los histogramas anteriores se valida que las puntuaciones de cada uno de los grupos de riesgo, así como el que combina a los tres siguen una distribución normal.

5.5.1 Prueba de Kolmogorov – Smirnov.

Se considera un procedimiento de bondad de ajuste, es decir, permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica. Su objetivo es señalar si los datos de cada grupo provienen de una población que tiene la distribución teórica especificada.

Esta prueba se realiza para comprobar que la distribución normal de las calificaciones IGE_{TC} de los terraplenes carreteros en cada grupo, así como el de la unión de los tres sea verdadera. Se plantea la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_a):

- La hipótesis nula (H_0) se rechaza cuando los datos muestrales proporcionen evidencia convincente de que es falsa, o sea, que las puntuaciones IGE_{TC} siguen una distribución normal (p -valor > 0.05); donde 0.05 corresponde al nivel de significación con el que uno quiere rechazar la hipótesis nula.
- La hipótesis alternativa (H_a) es una afirmación que se acepta si los datos muestrales proporcionan evidencia suficiente de que la hipótesis nula es falsa, o sea, que las puntuaciones IGE_{TC} no siguen una distribución normal (p -valor < 0.05).

Para obtener los valores que delimitan si la hipótesis nula será rechazada o afirmada utilizamos el software estadístico SPSS V19.0, el cual nos arroja los p -valores para cada grupo y con ellos tomar el criterio correcto (Tabla 5.8).

Tabla 5.8 Prueba de Kolmogorov – Smirnov (Software SPSS V19.0)

	N	Media	Desviación típica	Mínimo	Máximo
GRUPO1	14	126.21	56.217	60	258
GRUPO2	19	186.63	57.390	105	294
GRUPO3	7	206.57	50.302	117	276
GRUPOS_UNIDOS	40	166.48	61.792	60	294

		GRUPO1	GRUPO2	GRUPO3	GRUPOS_UNIDOS
N		14	19	7	40
Parámetros normales ^{a, b}	Media	126.21	186.63	206.57	166.48
	Desviación típica	56.217	57.390	50.302	61.792
Diferencias más extremas	Absoluta	.167	.177	.221	.073
	Positiva	.167	.177	.117	.073
	Negativa	-.119	-.104	-.221	-.062
Z de Kolmogorov-Smirnov		.624	.771	.584	.463
Sig. asintót. (bilateral)	(p- valores)	.832	.592	.885	.983

a. La distribución de contraste es la Normal.
b. Se han calculado a partir de los datos.

En todos los casos la hipótesis nula fue aceptada, por tanto, las calificaciones IGE_{TC} en cada grupo, así como la unión de los tres presentan una distribución normal.

5.5.2 Análisis de varianza (Prueba ANOVA).

La prueba de varianza (ANOVA) nos permite comparar si existe diferencia entre las medias de los tres grupos obtenidos (Alto, Medio y Bajo).

Se basa en la comparación de las sumas de cuadrados medias debidas a la variabilidad entre-grupos y la debida a la variabilidad intra-grupos (dentro de los grupos). Ambas sumas son estimaciones independientes de la variabilidad global, de manera que, si el cociente entre la primera y la segunda es grande, se tendrá mayor probabilidad de rechazar la hipótesis nula. Se plantea la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_a):

- $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$
- $H_a = \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

Por ello, un $p\text{-valor} < 0.05$ indicara que las medias son estadísticamente distintas y la hipótesis nula se rechaza. En caso contrario ($p\text{-valor} > 0.05$), la hipótesis nula es aceptada.

Utilizando el software estadístico SPSS V19.0 y las pruebas de rango de Tukey y Duncan para identificar sub-conjuntos homogéneos de medias que no se diferencian entre sí; obtenemos la tabla ANOVA para la identificación de rechazo o aceptación de la hipótesis nula (Tabla 5.9).

Tabla 5.9 Análisis de varianza (ANOVA) (Software SPSS V19.0)

PUNTUACIÓN_IGE					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Inter-grupos	41416.483	2	20708.241	6.631	.003
Intra-grupos	115550.492	37	3122.986		
Total	156966.975	39			

Con base en base al resultado obtenido ($0.003 < 0.05$), rechazamos la hipótesis nula concluyendo que las medias de cada grupo son estadísticamente distintas.

5.5.3 Prueba T - Test.

Para verificar la validez del criterio de los rangos de puntuación establecidos por el análisis de conglomerados, se utiliza una prueba t-test con la cual se compara con los límites superiores e inferiores de cada grupo de acuerdo a su nivel de inestabilidad. Los criterios de rechazo de la hipótesis nula se encuentran en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10 Criterios de rechazo de hipótesis nula

	GRUPO 1	GRUPO 2		GRUPO 3
HIPÓTESIS	$H_0 = \mu \leq \mu_0$ $H_a = \mu > \mu_0$ $\mu_0 = 130$	$H_0 = \mu \geq \mu_0$ $H_a = \mu < \mu_0$ $\mu_0 = 130$	$H_0 = \mu \leq \mu_0$ $H_a = \mu > \mu_0$ $\mu_0 = 300$	$H_0 = \mu \geq \mu_0$ $H_a = \mu < \mu_0$ $\mu_0 = 300$
REGIÓN DE RECHAZO PARA EL NIVEL DE PRUEBA $\alpha=0.05$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$ y $t > 0$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$ y $t > 0$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$ y $t > 0$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$ y $t > 0$

Utilizando el software estadístico SPSS V19.0 se obtiene los valores determinativos para la decisión de rechazar o aceptar la hipótesis nula (Tabla 5.11).

Tabla 5.11 Tabla de valores obtenidos mediante el SPSS V19.0

Grupo 1 y 2

	N	Media	Desviación tip.	Error tip. de la media
GRUPO_1	14	126.21	56.217	15.025
GRUPO_2	19	186.63	57.390	13.166

Valor de prueba = 150						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
					Inferior	Superior
GRUPO_1	-1.583	13	.137	-23.786	-56.24	8.67
GRUPO_2	2.782	18	.002	36.632	8.97	64.29

Grupo 2 y 3

	N	Media	Desviación tip.	Error tip. de la media
GRUPO_2	19	186.63	57.390	13.166
GRUPO_3	7	206.57	50.302	19.012

Valor de prueba = 300						
	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
					Inferior	Superior
GRUPO_2	-8.611	18	.000	-113.368	-141.03	-85.71
GRUPO_3	-4.914	6	.003	-93.429	-139.95	-46.91

La aceptación o rechazo del criterio para los rangos de puntuación se establecen en la Tabla 5.12. Considerando que para el grupo 3, la media es la extrapolada; debido a que con ella se obtuvieron los rangos de puntuación mencionados anteriormente.

Tabla 5.12 Criterios para la validación de los rangos de puntuación.

	GRUPO 1	GRUPO 2		GRUPO 3
HIPÓTESIS	$H_0 = \mu \leq \mu_0$ $H_a = \mu > \mu_0$ $\mu_0 = 150$	$H_0 = \mu \geq \mu_0$ $H_a = \mu < \mu_0$ $\mu_0 = 150$	$H_0 = \mu \leq \mu_0$ $H_a = \mu > \mu_0$ $\mu_0 = 300$	$H_0 = \mu \geq \mu_0$ $H_a = \mu < \mu_0$ $\mu_0 = 300$
Media (μ)	126.21	186.63	186.63	309.85
Validación	$126.21 \leq 150$	$186.63 \geq 150$	$186.63 \leq 300$	$309.85 \geq 300$
Desv. estándar	56.217	57.39	57.39	50.302
t	-1.583	2.782	-8.611	-4.914
(sig.(2-tailed))/2	0.137	0.002	0.000	0.003
REGIÓN DE RECHAZO PARA EL NIVEL DE PRUEBA $\alpha=0.05$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$ y $t > 0$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$ y $t > 0$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$ y $t > 0$	$[(\text{sig.}(2\text{-tailed})/2) < \alpha]$ y $t > 0$
Rechazo de H_0	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza	No se rechaza

Concluyendo así, que los rangos de puntuación para los niveles de estabilidad de los terraplenes carreteros en base al Índice General de Estabilidad (IGETC) son adecuados.

5.6 Resultados.

En base al IGETC obtenido identificamos a los terraplenes según el nivel de inestabilidad que presentan (Tabla 5.13).

Tabla 5.13 Niveles de inestabilidad y valoración IGETC

CODIGO IDENTIFICACION	IGETC	NIVEL DE INESTABILIDAD	CODIGO IDENTIFICACION	IGETC	NIVEL DE INESTABILIDAD
T1A01	78	BAJO	T1A21	219	MEDIO
T1A02	60	BAJO	T1A22	294	MEDIO
T1A03	75	BAJO	T1A23	189	MEDIO
T1A04	126	BAJO	T1B24	105	BAJO
T1B05	99	BAJO	T1A25	156	MEDIO
T1A06	147	BAJO	T1B26	195	MEDIO
T1A07	102	BAJO	T2A27	132	BAJO
T1A08	180	MEDIO	T2B28	204	MEDIO
T1A09	135	BAJO	T2A29	147	BAJO
T1A10	186	MEDIO	T2B30	255	MEDIO
T1A11	141	BAJO	T3A31	189	MEDIO
T1A12	279	MEDIO	T3B32	189	MEDIO
T1A13	114	BAJO	T3A33	228	MEDIO

T1A14	156	MEDIO	T3B34	219	MEDIO
T1A15	75	BAJO	T3A35	276	MEDIO
T1B16	90	BAJO	T3B36	246	MEDIO
T1A17	168	MEDIO	T3A37	120	BAJO
T1A18	258	MEDIO	T3B38	117	BAJO
T1A19	213	MEDIO	T3A39	279	MEDIO
T1B20	159	MEDIO	T3B40	177	MEDIO

Como ejemplo de un terraplén con una calificación $IGE_{TC} < 150$ puntos, es el caso del T1A02 y T1A09.

- T1A02.
 - Tiene un ángulo de 35° y una altura de 8.50 metros. La vegetación localizada en el talud es densa con una altura promedio de 20 cm. (Imagen 5.1).



Imagen 5.1 Terraplén T1A02

- No se presentaba evidencia de erosión en el talud ni asentamientos evidentes sobre la calzada.
- En los lavaderos se identificó grietas selladas con un ancho $< 1\text{mm}$ y una separación con la vía $< 1\text{mm}$. En la cuneta central se observa un bloque de fracturamiento en cada tablero. Existen pequeñas piedras y material transportado por las lluvias, sin obstruir el flujo.
- Existe inicio de grietas de borde, así como grietas longitudinales con una abertura de 2.5 mm en carril de alta velocidad. y centro de línea (Imagen 5.2).



Imagen 5.2 Superficie del pavimento del Terraplén T1A02

- Se presenta las calificaciones obtenidas en la evaluación:

FACTORES		PUNTUACIÓN
GEOMETRIA	ANGULO	3
	ALTURA	9
VEGETACIÓN	ALTURA	9
	% DE COBERTURA	3
OBRAS DE DRENAJE	ESCALONAMIENTO	3
	GRIETAS	3
	DESGASTE DE LA SUPERFICIE	3
	DESPOSTILLAMIENTO	-
	FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	3
	SEPARACION DE LA CUNETA ^c /LA VIA	3
	OBSTRUCCIONES	3
EROSIÓN		3
ASENTAMIENTO		3
PAVIMENTO	FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO	-
	GRIETAS EN BLOQUE	-
	GRIETAS DE BORDE	3
	GRIETAS LONGITUDINALES	9
	GRIETAS TRANSVERSALES	-
	AHUELLAMIENTO (RODERAS)	-
	BACHES	-
CALIFICACION IGE _{TC} :		60

- T1A09.
 - Tiene un ángulo de 25° y una altura de 3.60 m. La vegetación existente son arboles con una altura mayor a 60 cm. unido con zacate de 10 cm de altura y se encuentra cubierto al 100% (Imagen 5.3).



Imagen 5.3 Talud de terraplén T1A09

- Presenta un asentamiento poco evidente en la calzada.
- Existe fisuras por fatigamiento con una separación de 2 mm así también el inicio de grietas de borde y grietas longitudinales. El ahuellamiento que presenta es inicial con una profundidad de 3 mm (Imagen 5.4).



Imagen 5.4 Superficie del pavimento del terraplén T1A09.

- Se presenta las calificaciones obtenidas en la evaluación:

FACTORES		PUNTUACIÓN
GEOMETRIA	ANGULO	3
	ALTURA	3
VEGETACIÓN	ALTURA	81
	% DE COBERTURA	3
OBRAS DE DRENAJE	ESCALONAMIENTO	3
	GRIETAS	3
	DESGASTE DE LA SUPERFICIE	3
	DESPOSTILLAMIENTO	3
	FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	-
	SEPARACION DE LA CUNETAS ^c /LA VIA	-
	OBSTRUCCIONES	9
	EROSIÓN	3
ASENTAMIENTO		9
PAVIMENTO	FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO	3
	GRIETAS EN BLOQUE	-
	GRIETAS DE BORDE	3
	GRIETAS LONGITUDINALES	3
	GRIETAS TRANSVERSALES	-
	AHUELLAMIENTO(RODERAS)	3
	BACHES	-
CALIFICACION IGE _{TC} :		135

Como ejemplo de un terraplén con una calificación IGE_{TC} de 150 a 300 puntos, es el caso del T1A12, T1A18, T2A22, T2B30 y T3A39.

- T1A12.
 - Presenta un ángulo de 30° y una altura de 4.60 m. Un 75% está cubierto de vegetación, con una altura de 20 cm. Los árboles mayores a 60 cm. se localizan en el pie del talud por lo que el riesgo no es significativo ya que sirve como protección (defensa) contra deslizamientos por el comportamiento tipo enredadera de las raíces (Imagen 5.5).



Imagen 5.5 Terraplén T1A12

- La mayoría de lavaderos están totalmente destruidos, no tiene continuidad en el concreto. Y los que están, presentan desgaste de la superficie y grietas de 9 mm de ancho con presencia de vegetación en ellas, así como obstrucción hasta un 50% de su longitud (Imagen 5.6).
- Aparición de grietas de borde y longitudinales. Grietas transversales con una abertura de 2.5 mm selladas insatisfactoriamente. Debido a problemas pasados se corrigió bache con caja abierta. Inicio de roderas, profundidad de 3 mm (Imagen 5.7).



Imagen 5.6 Obras de drenaje del terraplén T1A12



Imagen 5.7 Superficie del pavimento del terraplén T1A12

- Se presenta las calificaciones obtenidas en la evaluación:

FACTORES		PUNTUACIÓN
GEOMETRIA	ANGULO	3
	ALTURA	3
VEGETACIÓN	ALTURA	9
	% DE COBERTURA	9
OBRAS DE DRENAJE	ESCALONAMIENTO	3
	GRIETAS	27
	DESGASTE DE LA SUPERFICIE	27
	DESPOSTILLAMIENTO	9
	FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	81
	SEPARACION DE LA CUNETAS ^c /LA VIA	3
	OBSTRUCCIONES	81
	EROSIÓN	3
ASENTAMIENTO		3
PAVIMENTO	FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO	-
	GRIETAS EN BLOQUE	-
	GRIETAS DE BORDE	3
	GRIETAS LONGITUDINALES	3
	GRIETAS TRANSVERSALES	9
	AHUELLAMIENTO(RODERAS)	3
	BACHES	-
CALIFICACION IGE _{Tc} :		279

- T1A18.
 - Angulo de talud de 36° y una altura de 10 m. Esta cubierto al 100% de vegetación con una altura de 48 cm. (Imagen 5.8).



Imagen 5.8 Talud del terraplén T1A18

- Presenta un asentamiento muy evidente en la calzada. Datos pasados nos dice que se corrigió la rasante debido a problemas de asentamiento y grietas en el pavimento.
- Existe la presencia de grietas de borde con un ancho de 5 mm. Grietas longitudinales y transversales con ancho de 7 y 4 mm respectivamente (Imagen 5.9).



Imagen 5.9 Superficie del pavimento del terraplén T1A18

- Se presenta las calificaciones obtenidas en la evaluación:

FACTORES		PUNTUACIÓN
GEOMETRIA	ANGULO	3
	ALTURA	9
VEGETACIÓN	ALTURA	27
	% DE COBERTURA	3
OBRAS DE DRENAJE	ESCALONAMIENTO	9
	GRIETAS	9
	DESGASTE DE LA SUPERFICIE	9
	DESPOSTILLAMIENTO	3
	FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	9
	SEPARACION DE LA CUNETA ^c /LA VIA	-
	OBSTRUCCIONES	3
EROSIÓN		3
ASENTAMIENTO		81
PAVIMENTO	FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO	9
	GRIETAS EN BLOQUE	-
	GRIETAS DE BORDE	27
	GRIETAS LONGITUDINALES	27
	GRIETAS TRANSVERSALES	27
	AHUELLAMIENTO(RODERAS)	-
	BACHES	-
CALIFICACION IGE _{TC} :		258

- T2A22.
 - Ángulo de 30° y una altura de 18.50 m. Presenta una vegetación densa (100%) con una altura de 14 cm. Los arboles con altura mayor a 60 cm. se localizan en el pie del talud (Imagen 5.10).
 - En la cuneta central existen grietas de 6 mm de ancho y con presencia de vegetación en ellas. Con poco desgaste de los agregados y en cada tablero existen 2 bloques de fracturación (Imagen 5.10).



Imagen 5.10 Talud y cuneta central del terraplén T1A22

- Grietas longitudinales con severidad alta con abertura de 13 mm. Grietas de borde en un 30% de la longitud total del tramo con una abertura promedio de 7 mm. Roderas con una profundidad de 5 mm en el carril de baja velocidad. Existen grietas transversales con ancho aproximado de 2 mm pero selladas insatisfactoriamente (Imagen 5.11).
- Se observa un asentamiento muy evidente en la calzada, comprendido en toda la longitud que abarca la grieta longitudinal.



Imagen 5.11 Superficie del pavimento del terraplén T1A22

- Se presenta las calificaciones obtenidas en la evaluación:

FACTORES		PUNTUACIÓN
GEOMETRIA	ANGULO	3
	ALTURA	27
VEGETACIÓN	ALTURA	3
	% DE COBERTURA	3
OBRAS DE DRENAJE	ESCALONAMIENTO	-
	GRIETAS	27
	DESGASTE DE LA SUPERFICIE	9
	DESPOSTILLAMIENTO	-
	FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	9
	SEPARACION DE LA CUNETAS ^c /LA VIA	-
	OBSTRUCCIONES	-
EROSIÓN		3
ASENTAMIENTO		27
PAVIMENTO	FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO	3
	GRIETAS EN BLOQUE	-
	GRIETAS DE BORDE	81
	GRIETAS LONGITUDINALES	81
	GRIETAS TRANSVERSALES	9
	AHUELLAMIENTO(RODERAS)	9
	BACHES	-
CALIFICACION IGE _{TC} :		294

- T2B30.
 - Presenta un ángulo de 55° con una altura de 19 m se encuentra en un 90% cubierto de vegetación, con una altura de 10 cm. Pequeñas zonas están descubiertas pero insignificantes para un problema (Imagen 5.12).



Imagen 5.12 Talud del terraplén T2B30

- Las obras de drenaje presentaban grietas selladas insatisfactoriamente con anchos de 1 a 3 mm unido con desgaste del agregado y formación de grietas en bloque en los tableros de la cuneta central. No era visible ninguna obstrucción.
- Por la abertura de las grietas longitudinales y transversales (selladas insatisfactoriamente) son clasificadas con severidad alta, siendo evidente que el terraplén presenta problemas de inestabilidad. Unido a ello, se observa poca evidencia de asentamiento (Imagen 5.13).



Imagen 5.13 Superficie del pavimento del terraplén T2B30

- Se presenta las calificaciones obtenidas en la evaluación:

FACTORES		PUNTUACIÓN
GEOMETRIA	ANGULO	9
	ALTURA	27
VEGETACIÓN	ALTURA	3
	% DE COBERTURA	3
OBRAS DE DRENAJE	ESCALONAMIENTO	3
	GRIETAS	9
	DESGASTE DE LA SUPERFICIE	9
	DESPOSTILLAMIENTO	3
	FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	9
	SEPARACION DE LA CUNETAS ^c /LA VIA	-
	OBSTRUCCIONES	-
	EROSIÓN	3
ASENTAMIENTO		9
PAVIMENTO	FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO	3
	GRIETAS EN BLOQUE	-
	GRIETAS DE BORDE	3
	GRIETAS LONGITUDINALES	81
	GRIETAS TRANSVERSALES	81
	AHUELLAMIENTO (RODERAS)	-
	BACHES	-
CALIFICACION IGE _{TC} :		255

- T3A39.
 - Presenta un ángulo de 48° con una altura de 20 m. Con una vegetación densa (90%) con altura promedio de 25 cm. Cerca de la vía se aprecia agrietamiento en talud con anchura de 2.5 cm riesgo de infiltración y deslizamiento (Imagen 5.14).



Imagen 5.14 Talud del terraplén T3A39

- En lavaderos se observa pequeño escalonamiento de 3 mm y desgaste de la superficie no significativo. En la cuneta central existen grietas con ancho de 5 mm y vegetación en ellas. En los tableros se observa grietas en bloque con separación de 3 mm (Imagen 5.15).
- Se observó inicio de grietas por fatigamiento y ahuellamiento (profundidad de 4 mm) en carril de baja. Grietas de borde con una anchura de 6 mm en un 10% de la longitud total del terraplén, así como también grietas longitudinales con severidad alta (abertura 11 mm). Las grietas transversales se encontraban selladas insatisfactoriamente, con una anchura de 3 mm aproximadamente (Imagen 5.16).



Imagen 5.15 Cuneta central del terraplén T3A39



Imagen 5.16 Superficie del pavimento del terraplén T3A39

- Se presenta las calificaciones obtenidas en la evaluación:

FACTORES		PUNTUACIÓN
GEOMETRIA	ANGULO	9
	ALTURA	27
VEGETACIÓN	ALTURA	9
	% DE COBERTURA	3
OBRAS DE DRENAJE	ESCALONAMIENTO	9
	GRIETAS	27
	DESGASTE DE LA SUPERFICIE	9
	DESPOSTILLAMIENTO	3
	FRACTURAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	27
	SEPARACION DE LA CUNETA ^c /LA VIA	-
	OBSTRUCCIONES	3
EROSIÓN		3
ASENTAMIENTO		27
PAVIMENTO	FISURAS Y GRIETAS POR FATIGAMIENTO	3
	GRIETAS EN BLOQUE	-
	GRIETAS DE BORDE	27
	GRIETAS LONGITUDINALES	81
	GRIETAS TRANSVERSALES	9
	AHUELLAMIENTO (RODERAS)	3
	BACHES	-
CALIFICACION IGE _{TC} :		279

En forma gráfica se presentan las calificaciones IGE_{TC} de todos los terraplenes del tramo carretero Maravatío-Zapotlanejo en ambos cuerpos (A y B), esto con la finalidad de obtener un larguillo, el cual permita identificar de una manera más eficiente los terraplenes próximos a fallar (de acuerdo a su puntuación IGE_{TC}); así también comparativas del porcentaje de cada nivel de inestabilidad existente en los terraplenes de acuerdo al tramo en donde estén localizados, que unidos comprende la Maravatío-Zapotlanejo (Gráfico 5.1, 5.2 y 5.3). Debido a las dimensiones del larguillo, se encuentra dividido (Figura 5.11 a 5.22).

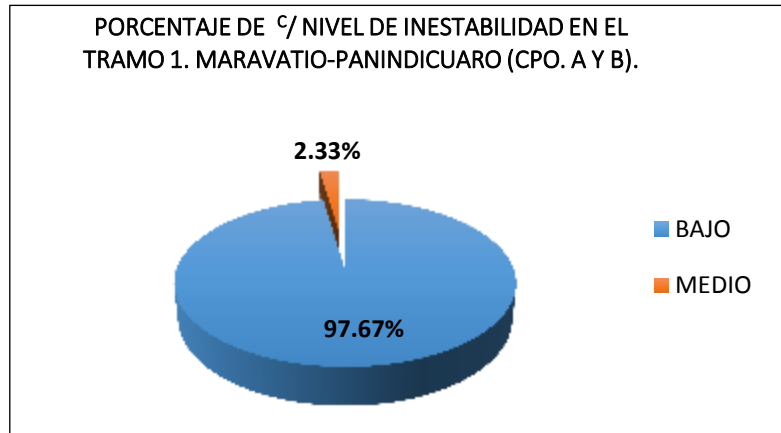


Gráfico 5.1 Porcentaje de cada nivel de inestabilidad en el Tramo 1 en relación con su longitud.

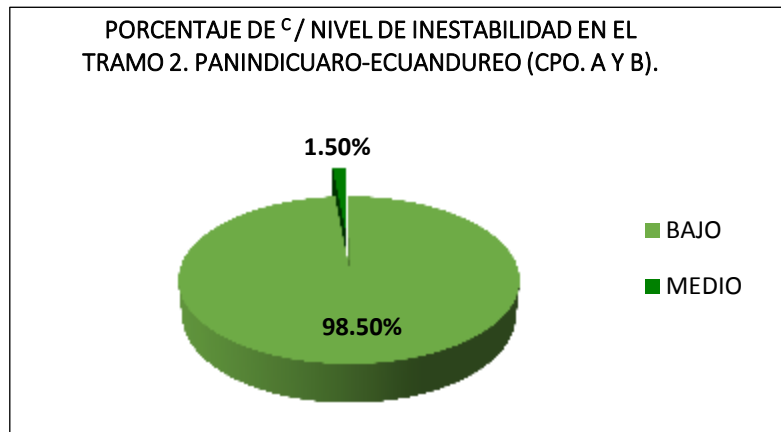


Gráfico 5.2 Porcentaje de cada nivel de inestabilidad en el Tramo 2 en relación con su longitud.

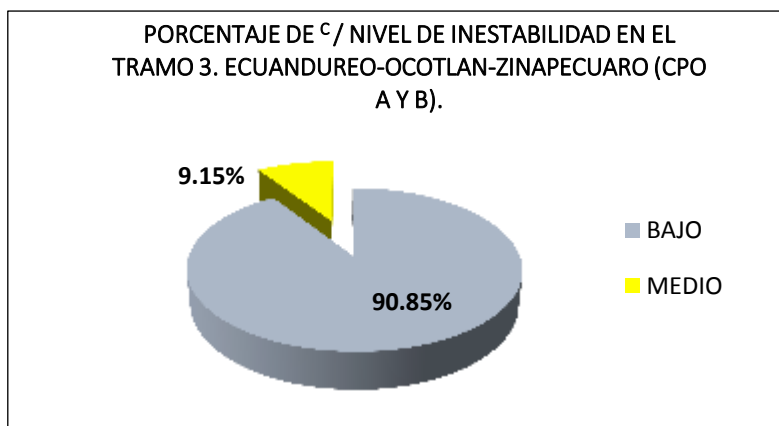


Gráfico 5.3 Porcentaje de cada nivel de inestabilidad en el Tramo 3 en relación con su longitud

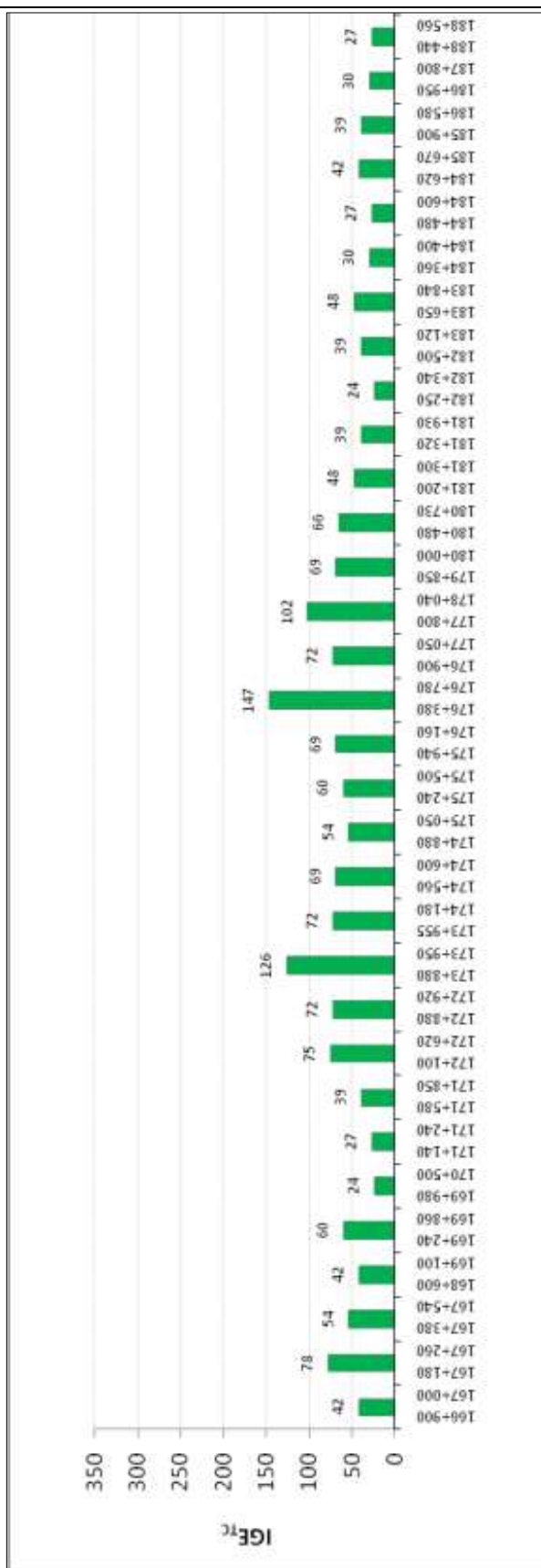


Figura 5.11 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatío – Zapotlanejo, cuerpo A (No. 1/6).

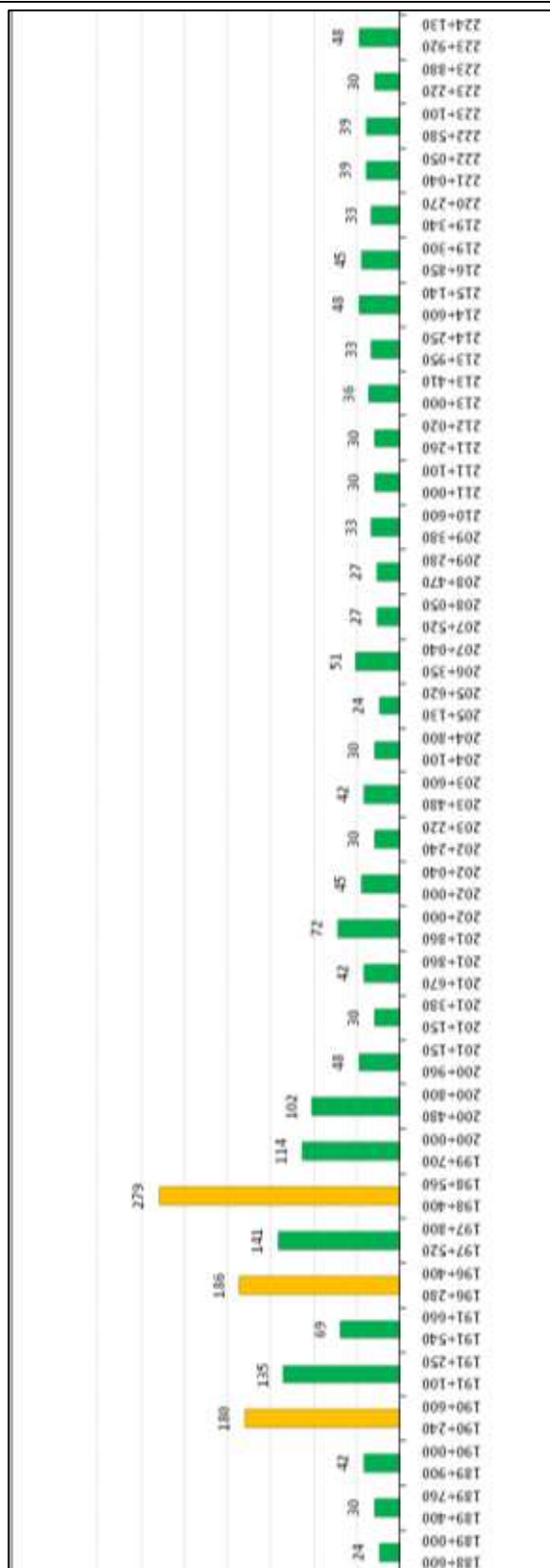


Figura 5.12 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatío – Zapotlanejo, cuerpo A (No. 2/6).

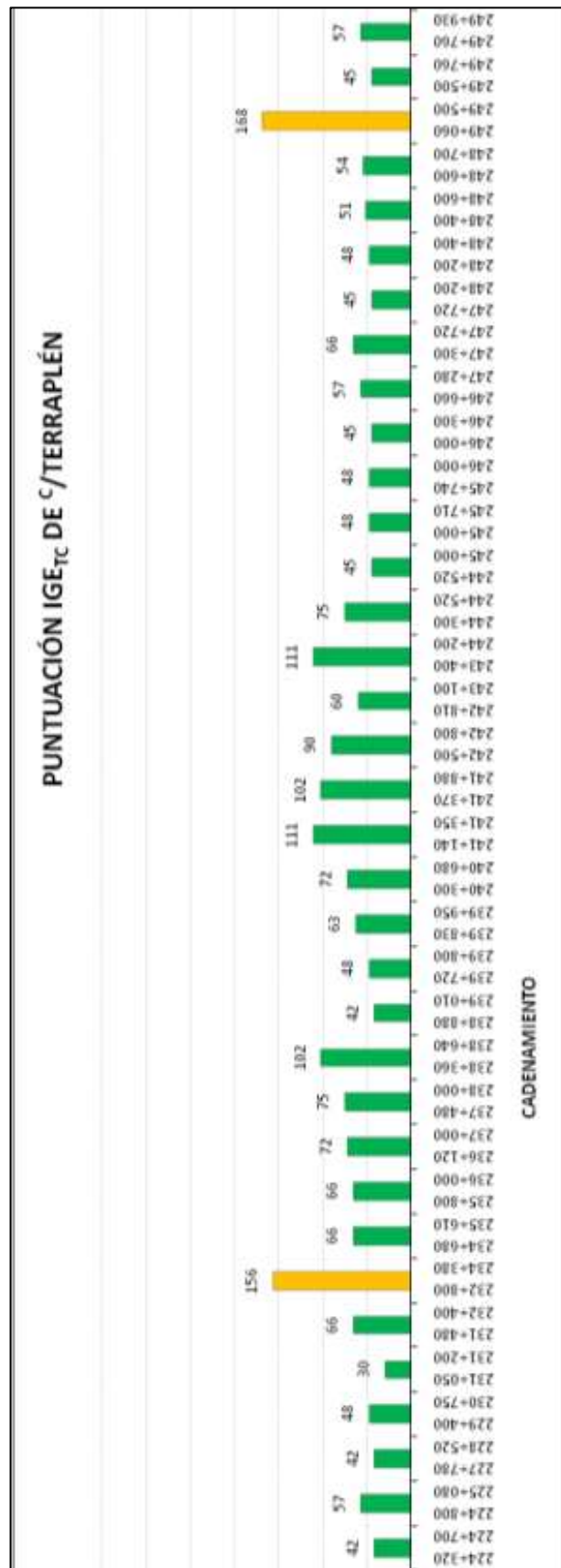


Figura 5.13 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatío – Zapotlanejo, cuerpo A (No. 3/6).

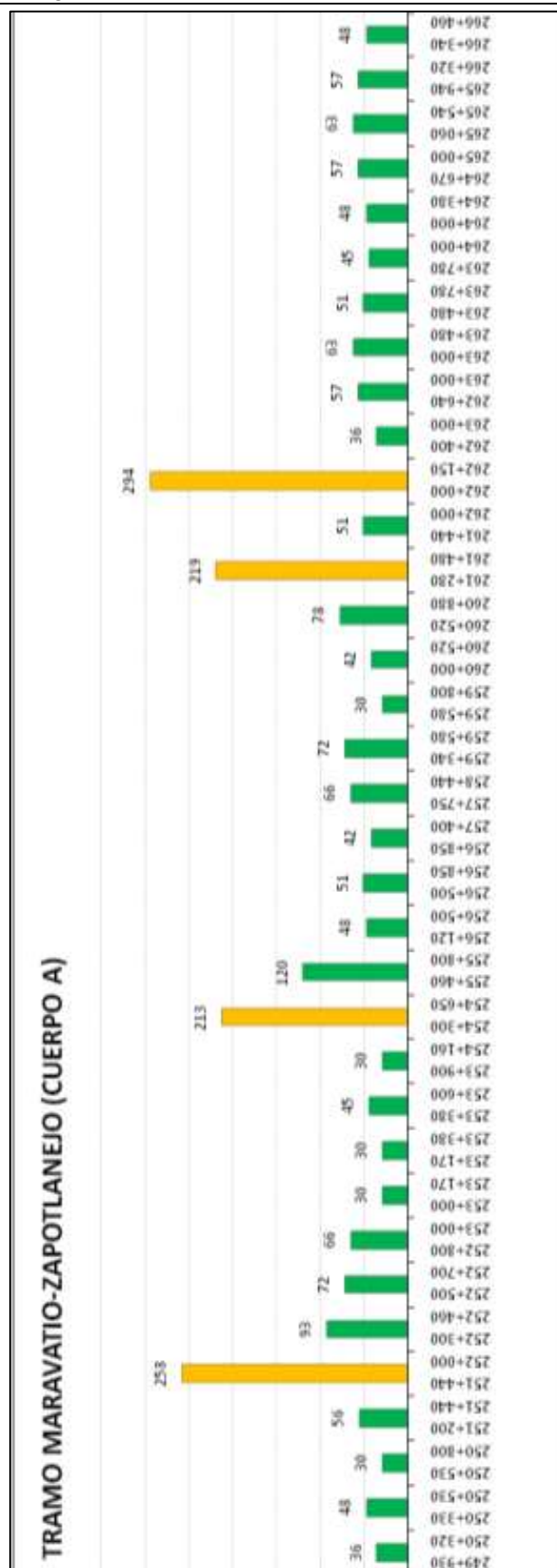


Figura 5.14 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatio – Zapotlanejo, cuerpo A (No. 4/6).

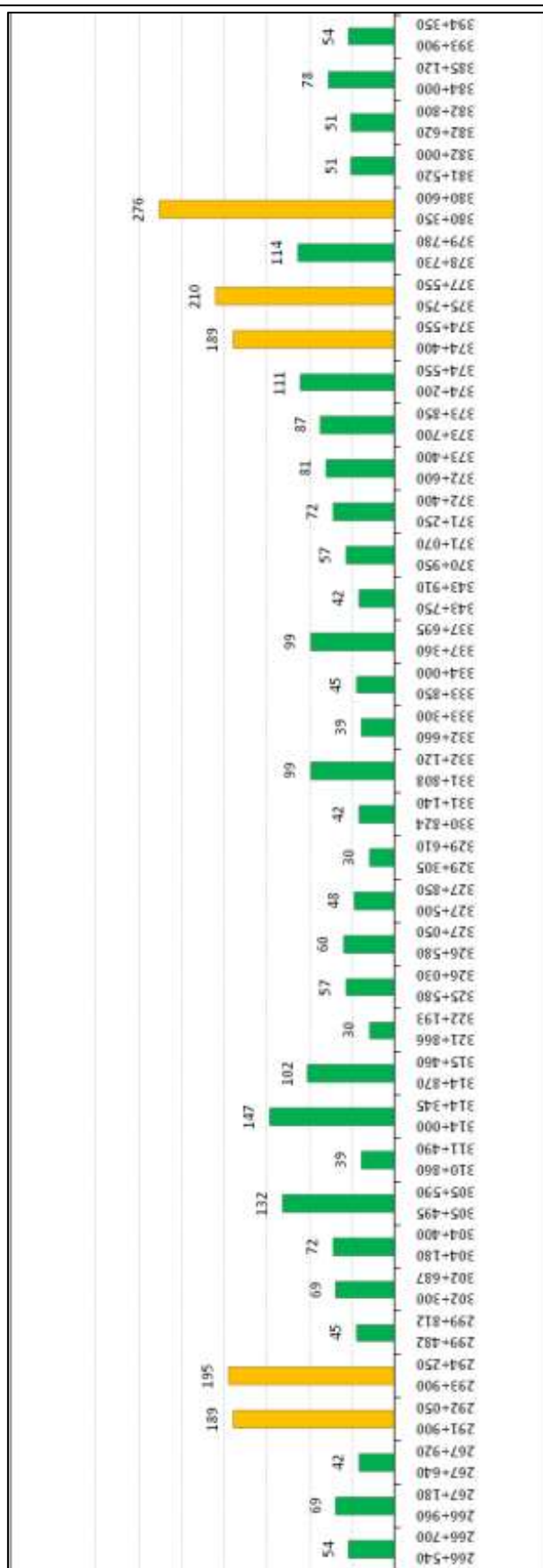


Figura 5.15 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatío – Zapotlanejo, cuerpo A (No. 5/6).

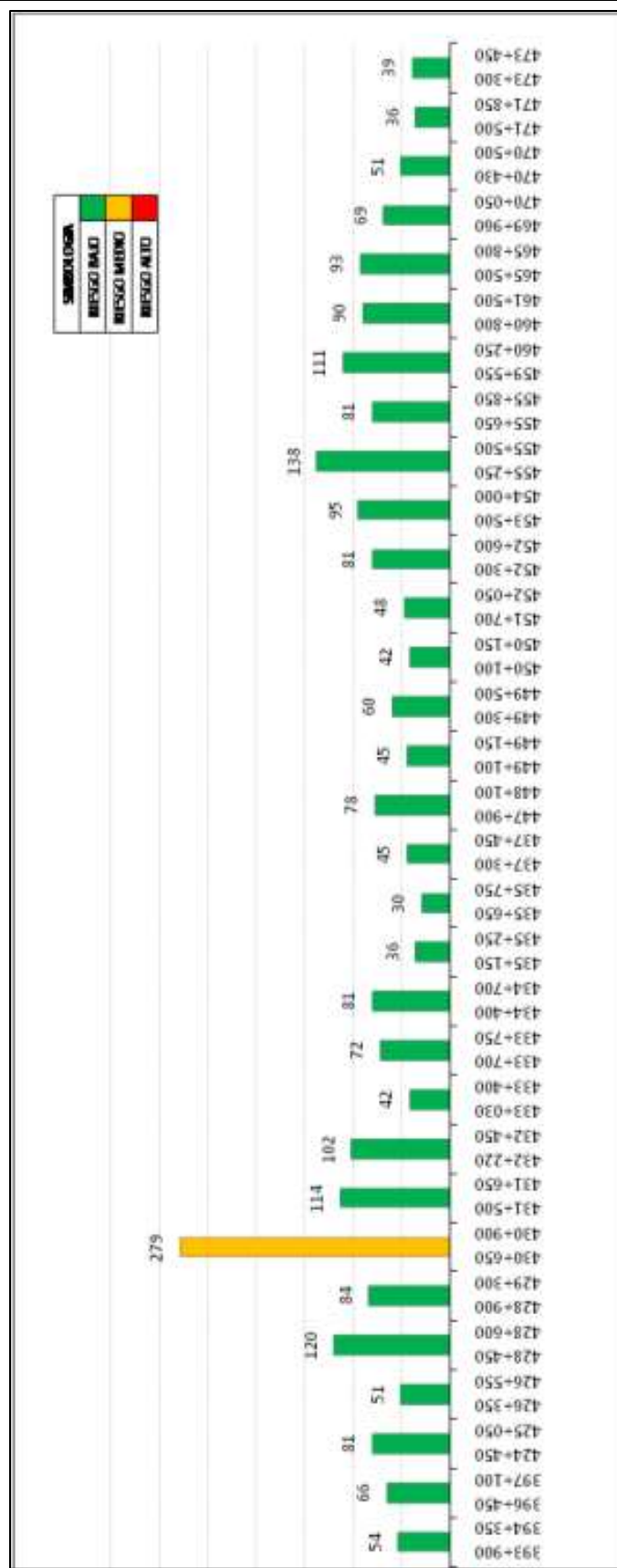


Figura 5.16 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatío – Zapotlanejo, cuerpo A (No. 6/6).

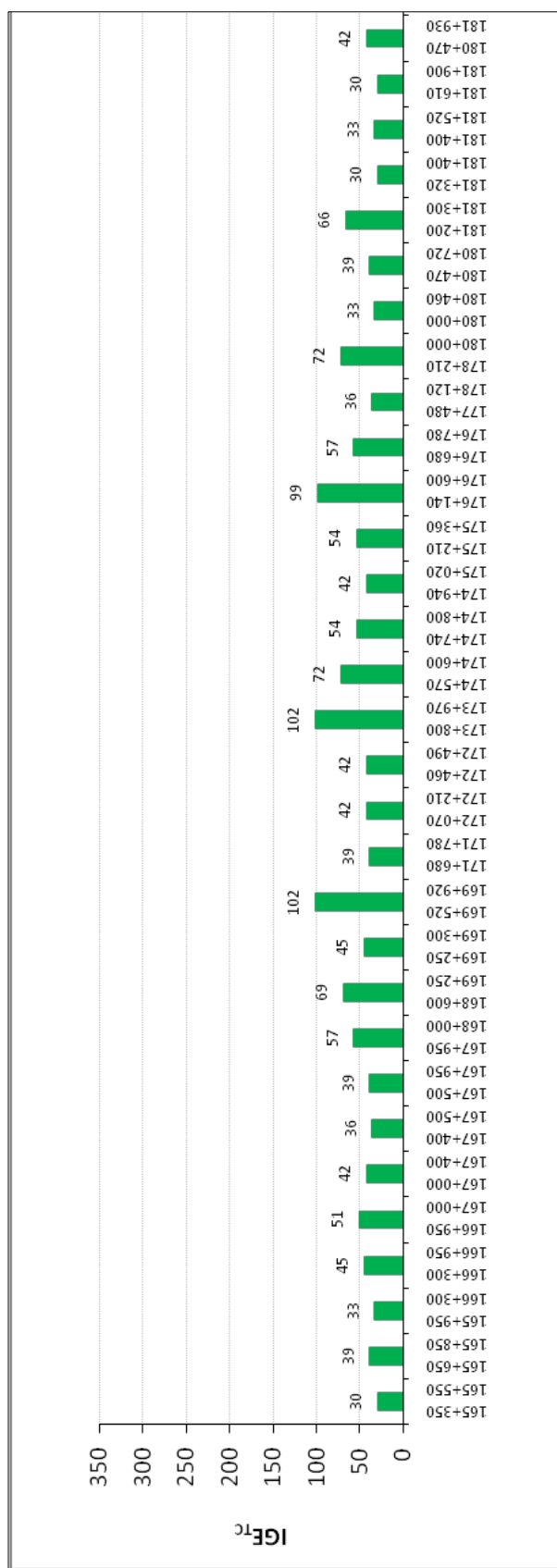


Figura 5.17 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatío-Zapotlanejo, cuerpo B (No. 1/6).

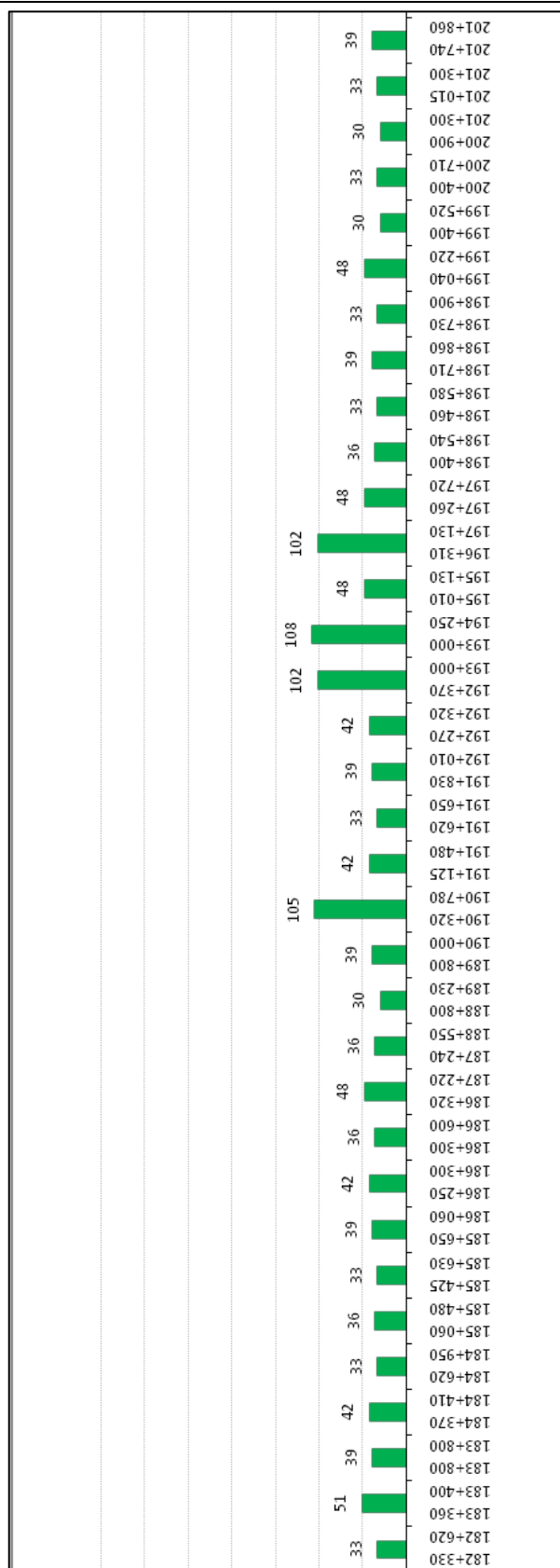


Figura 5.18 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatío-Zapotlanejo, cuerpo B (No. 2/6).

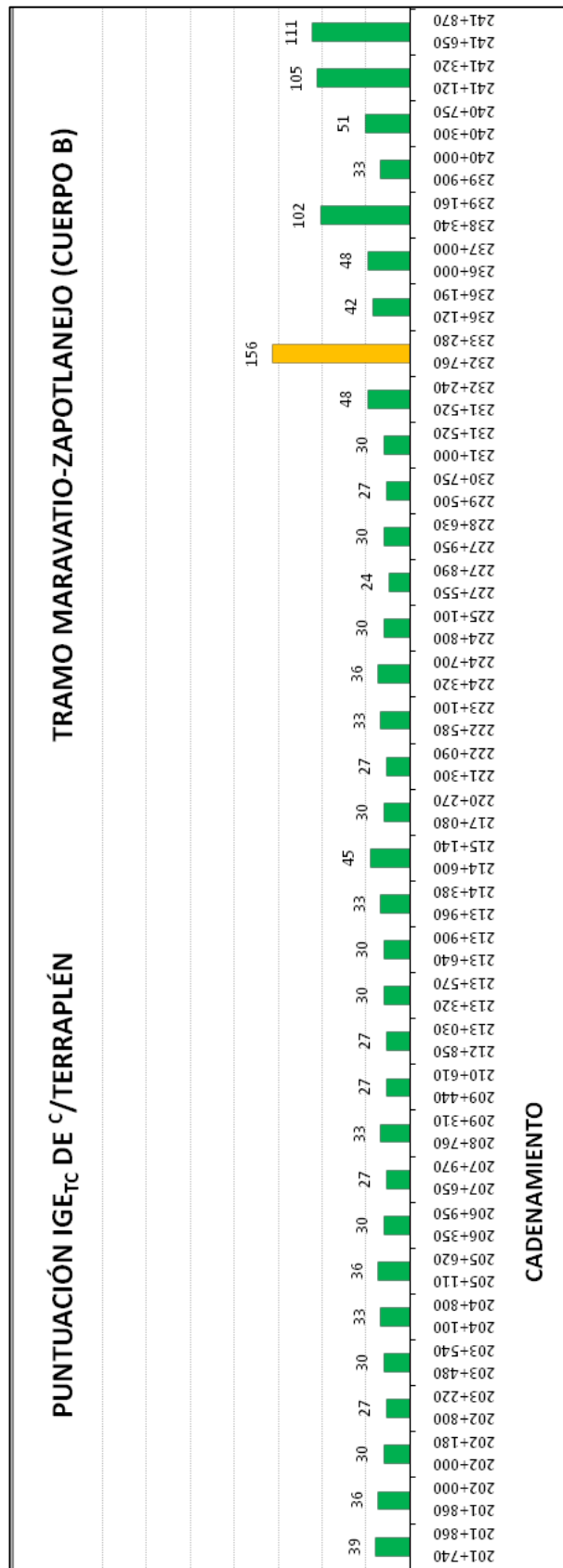


Figura 5.19 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatio-Zapotlanejo, cuerpo B (No. 3/6).

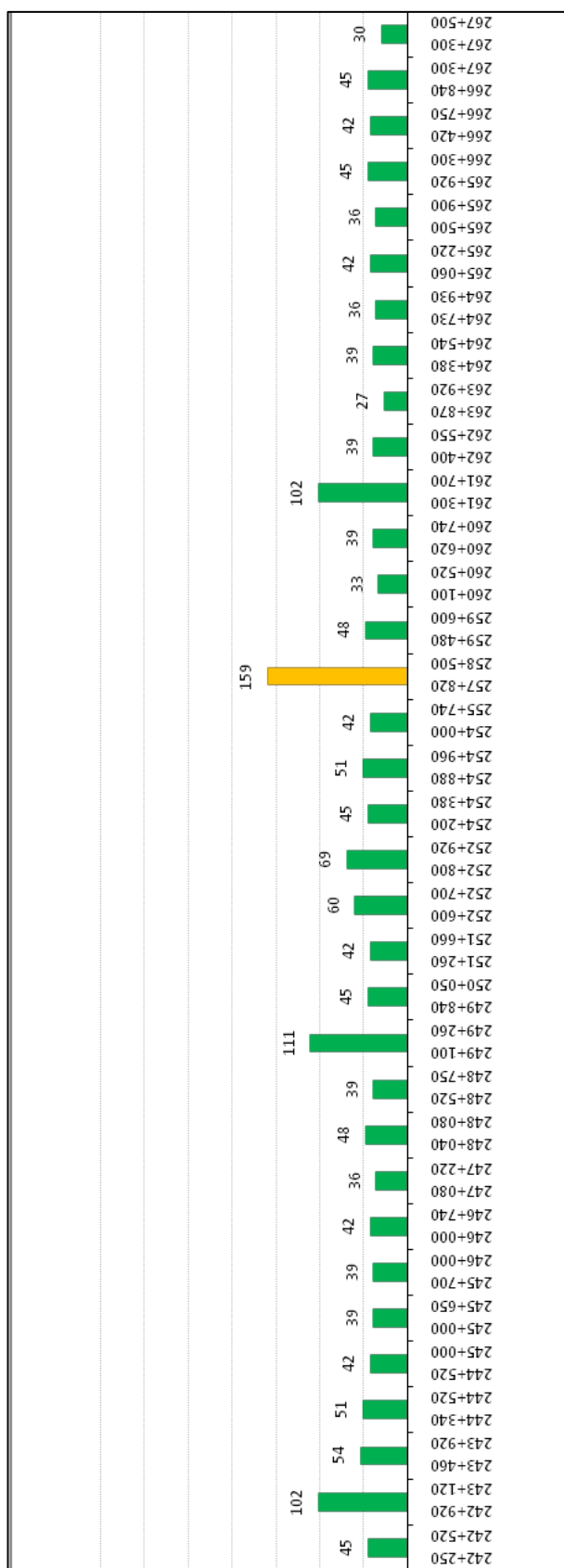


Figura 5.20 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatío-Zapotlanejo, cuerpo B (No. 4/6).

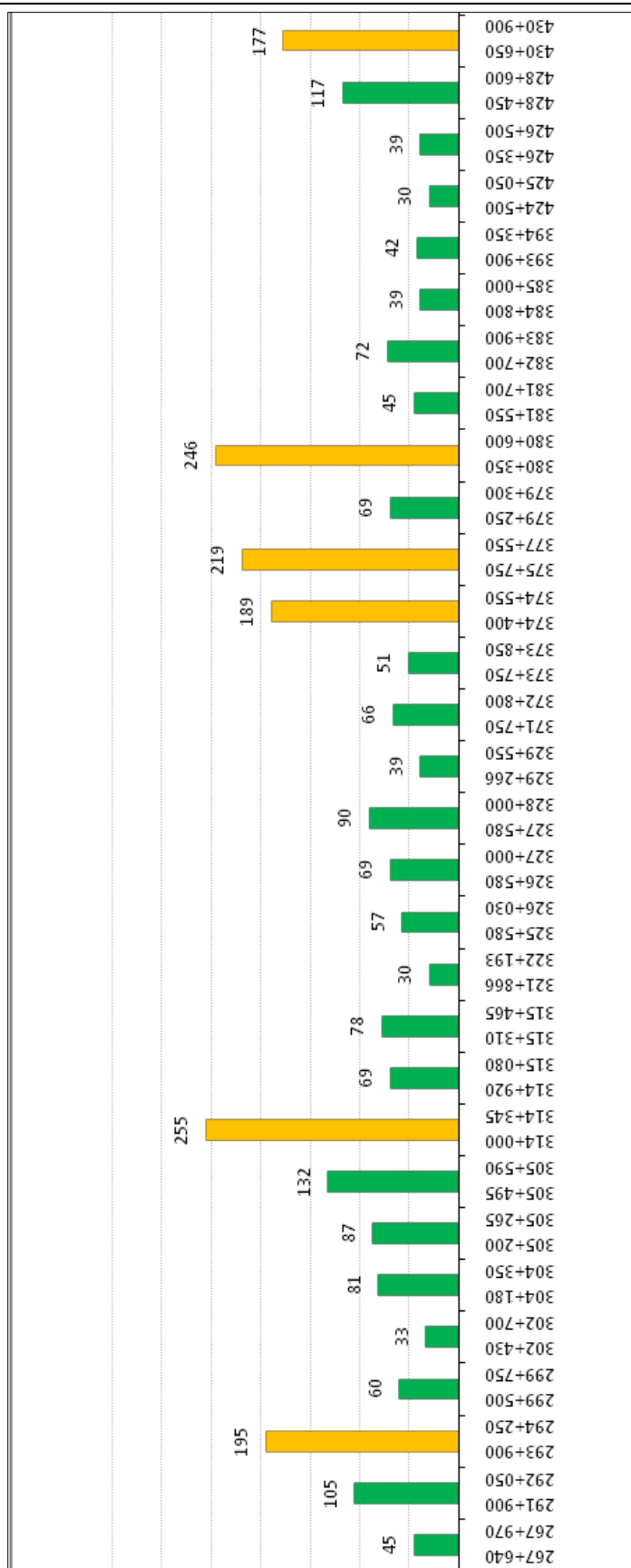


Figura 5.21 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatío-Zapotlanejo, cuerpo B (No. 5/6).

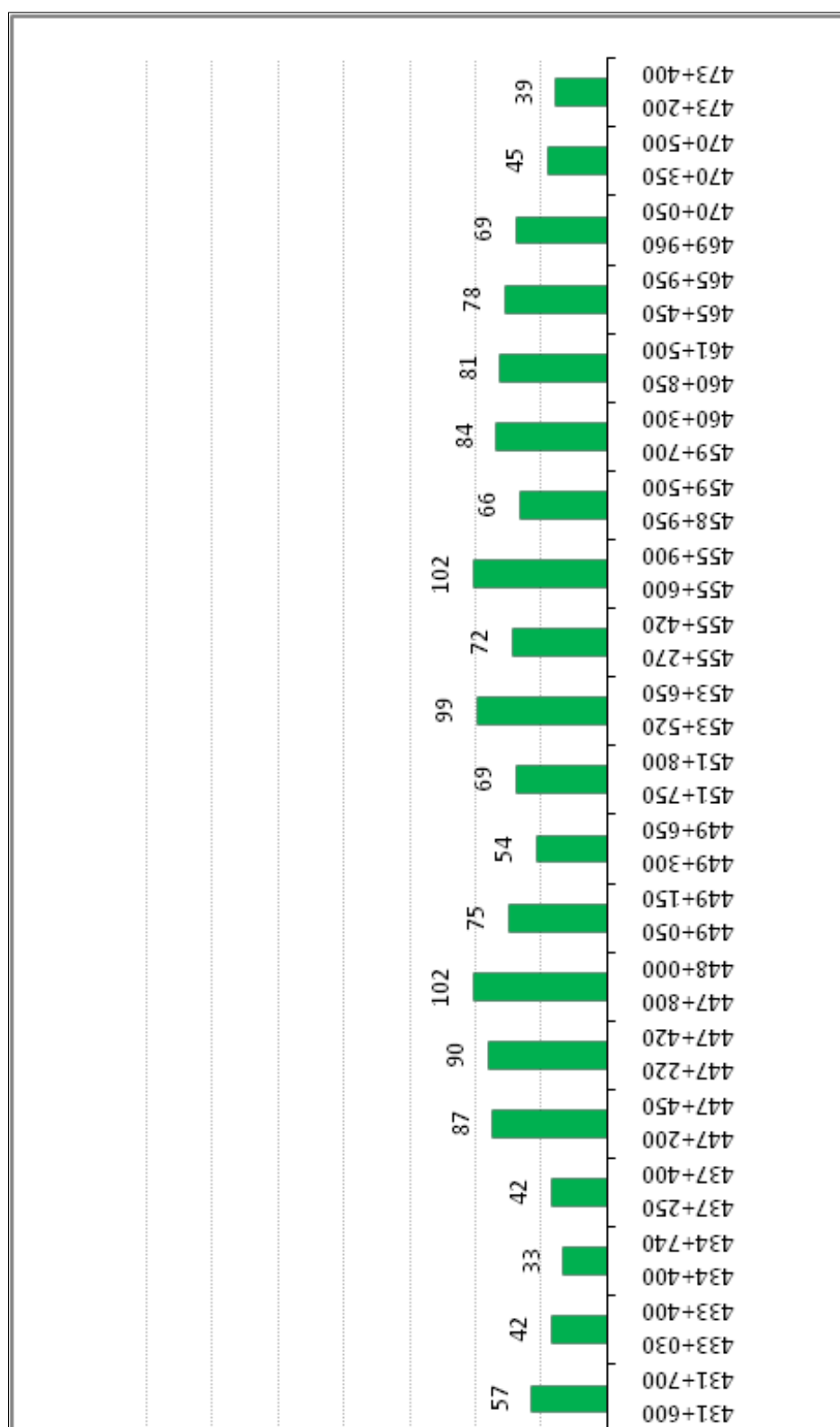


Figura 5.22 Larguillo de puntuaciones IGE_{TC} del tramo carretero Maravatío-Zapotlanejo, cuerpo B (No. 6/6).

6 Conclusiones.

- La necesidad del hombre por estimar el riesgo y la confiabilidad de los terraplenes, es lo que ha propiciado el desarrollo de distintos métodos, procedimientos y técnicas que le ayudan a tener una mayor certidumbre de las posibles causas, consecuencias y efectos que implicaría el que un terraplén fallase.
- Debido a los riesgos que corren los usuarios así como las pérdidas económicas de las empresas encargadas del mantenimiento, se inicia la búsqueda de un método sistemático y lógico capaz de lograr que los niveles de riesgo de los terraplenes se mantengan en los valores más convenientes para ayudar a prevenir catástrofes para los usuarios así como determinar los costos eficientes de reparación de un tiempo adecuado.
- El desarrollo de la Metodología de Evaluación permitirá a los departamentos de conservación y mantenimiento una clasificación de los terraplenes inestables o próximos a estarlos de acuerdo al nivel de riesgo que presenten. Así también, el monitoreo de las fallas y/o problemas existentes y saber en qué tiempo actuar para implementar acciones de corrección y mantenimiento que podría necesitar. Por ello es que se ha realizado todo este trabajo de investigación.
- Aunque otros factores que se introdujeron para la evaluación del riesgo de terraplenes carreteros no tenían una influencia estadísticamente significativa sobre la puntuación del Índice General de Estabilidad (IGE_{TC}), no indican que no se pueden utilizar para predecir el grado de riesgo que presentan en un sitio determinado. Por lo tanto, estos factores pueden ser importantes para evaluar el riesgo de inestabilidad, incluyen: la precipitación anual, el Tráfico Promedio Diario Anual y el costo/periodos de mantenimiento que presente.
- El rango más pequeño que puede obtenerse en el IGE es de 24 puntos para un terraplén totalmente estable sin ninguna falla y/o problemas en su estructura. Cumpliéndose un ángulo de 20 a 40°, una altura menor de 5 metros; en la pared del talud una vegetación densa con cobertura menor a 15 cm de altura. Sin presencia de erosión ni asentamientos y un buen estado de las obras del drenaje así como del pavimento.
- La base de datos es parte de un sistema que funcionará de una manera más completa y eficiente conforme a la cantidad de valores que se le vayan guardando de acuerdo a evaluaciones futuras. Esta, se convertirá en la experiencia de muchos evaluadores y herramienta útil para dar acciones de solución a cualquier problema de inestabilidad que se presente.

- Con los métodos estadísticos aquí aplicados se pretende lograr la clasificación de los grupos lo más homogéneamente posible en base a los factores (variables) observados.
- Teniendo en cuenta que se evaluó la autopista Maravatío-Zapotlanejo en su totalidad, en base a los terraplenes existentes en ella, se obtuvo en relación con su longitud los siguientes resultados:
 - Tramo 1. De su totalidad (240.251 km ambos cuerpos), el 97.67% (234 651 m) presenta un nivel de inestabilidad bajo, mientras que solo el 2.33% (5600 m). presenta un nivel medio.
 - Tramo 2. De su totalidad (23.036 km ambos cuerpos), el 98.50% (22 691 m) presenta un nivel de inestabilidad bajo, y solo el 1.50% (345 m), presenta un nivel medio.
 - Tramo 3. De su totalidad (53.56 km ambos cuerpos), el 90.85% (48 660 m) presenta un nivel de inestabilidad bajo y el 9.15% (4 900 m) un nivel medio.

Con base en lo anterior, concluimos que para los terraplenes que presentan un nivel de inestabilidad bajo no requieren acciones diferentes a las que actualmente son aplicadas. Por lo que, a los que presentan un nivel medio, necesitan de un mantenimiento mayor al actual o la ejecución de medidas correctivas para las fallas existentes.

6.1 RECOMENDACIONES.

- Para realizar dicho estudio, es necesario tomar en cuenta 2 pasos importantes: el desempeño de los activos así como el desempeño de las personas que intervienen en el sistema de gestión de activos, quienes finalmente serán los responsables de alimentar al sistema con la información necesaria. Logrando con esto la obtención de resultados óptimos.
- Cada puntuación dada debe ser en base a una inspección detallada recorriendo por lo menos 2/3 partes de la longitud total del terraplén.
- La aplicación del sistema de evaluación de clasificación del nivel de inestabilidad está diseñado para reflejar el potencial de riesgo creado por los diversos factores en base a la severidad que presenten en un terraplén de un tramo carretero. No se puede utilizar como un modelo matemático para predecir la probabilidad de una falla muy severa en un sitio, si no gestionar y con la información obtenida dar planes de solución.

- La evaluación del nivel de inestabilidad se desarrolla utilizando una cantidad limitada de información de los datos. Por ejemplo, la información relativa a costos y periodos de mantenimiento no estaba disponible para el tramo piloto. En las evaluaciones futuras, cuando se realice la inspección previa del campo y evaluación preliminar se debe de recolectar la mayor información posible del tramo. Como la base de datos se va desarrollando e incrementando conforme se van haciendo las evaluaciones, genera una información más completa, en donde debido a ello, la clasificación de los niveles de inestabilidad podría requerir un ajuste de los criterios de puntuación, así como análisis estadísticos adicionales.
- Es importante mencionar que los factores de geometría y vegetación son determinantes para tener una puntuación IGE alta sin que existan fallas y/o problemas, por ejemplo: si tenemos un terraplén estable pero éste presenta una altura mayor a 20 m con una cobertura de vegetación mayor a 60 cm se obtendría un valor de 162 puntos más los que resulten de la evaluación de los demás factores; caracterizando con solo esos 2 factores un nivel de inestabilidad medio. Por tal motivo, se recomienda que el ingeniero evaluador, en base a su criterio y experiencia para anotar si dichos factores presentan una relevancia importante en la inestabilidad de la estructura terrea al presentarse un caso de estos.
- Se recomienda el uso del análisis clúster, método estadístico que nos ayudara a obtener la información necesaria para la conclusión de este estudio, solo hay que recordar que las variables deben manejar la misma escala y es recomendable no tener un número muy elevado de ellas, para obtener un resultado más preciso. Es de suma importancia familiarizarse con el uso del software estadístico SSPS como herramienta.
- La validez de la metodología propuesta se comprueba a través del uso de técnicas de análisis multivariantes, incluyendo el método Kormogorov-Smirnov (K-S), Análisis de varianzas (ANOVA) y la prueba t-test. La prueba K-S se utiliza para la normalidad de las puntuaciones de riesgo determinadas (bajo, medio y alto) y todos los grupos combinados. Los resultados mostraron que correspondían con una normal. Los resultados del ANOVA muestran que los tres grupos de riesgo son estadísticamente diferentes.
Los resultados de la prueba t-test corroboran que los criterios para el rango de puntuación utilizados para clasificar los grupos de riesgo son eficaces. Las comparaciones de las puntuaciones de riesgo de diferentes sistemas han arrojado que el uso del sistema exponencial es mejor, ya que tiende a maximizar la eficacia de los valores numéricos usados para identificar a los factores de riesgo utilizados para la evaluación del terraplén.

Bibliografía

CONSEJO DE DIRECTORES DE CARRETERAS DE IBERIA E IBEROAMÉRICA. Catalogo de Deterioros de Pavimentos Flexibles. Volumen No. 11 2002.

D.O.K. Lo & W.M. Cheung. Assessment of Landslide Risk of Man-made Slopes in Hong Kong. Geotechnical Engineering Office. The government of the Hong Kong. 2004.

Duncan J.M. y Buchignani A. L. (1975), An Engineering Manual for Slope Stability Studies. Department of Civil Engineering, University of California.

Emergency Management Australia. Reducing the Community Impact of Landslides. Manual 24 Vol. 3. 2001.

ENVIRONMENT WAIKATO TECHNICAL REPORT NO.2009/02. Erosion & Sediment Control. Guidelines for Soil Disturbing Activities. January 2009.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Landfill Manuals. December 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program. US Department of Transportation. June 2003.

GARNICA, PAUL. Terraplenes. Publicación Técnica. Instituto Mexicano del Transporte.

Geotechnical Engineering Office. Guide to Slope Maintenance. The government of the Hong Kong. 2003.

GORDON KELLER Y JAMES SHERAR. Guía de campo para las mejores prácticas de Gestión en Caminos Rurales. Instituto Mexicano del Transporte. SCT. México 2005.

Iowa States University, Institute for Transportation. Optimization and Management of Materials in Earthwork Construction. Final Report April 2010.

JERALD S. FIELD, PH.D. Designing for Effective Sediment and Erosion Control on Construction Sites. Santa Bárbara, CA. 2004.

MENDOZA M. Enfoques recientes en la compactación de suelos. Publicación Técnica No. 33, Instituto Mexicano del Transporte.

Notes for Program on Recent Developments in the Design, Construction and Performance of Embankment Dams, University of California, Berkeley.

OLIVERA, FERNANDO. Estructuración de vías terrestres. Editorial CECSA. 2ª. Edición. México 1996.

PAUL H. WRIGHT/ KAREN K. DIXON. Highway Engineering. John Wiley and Sons Inc. Seventh Edition. USA 2004.

PEREZ LOPEZ, CESAR. Técnicas de análisis multivariante de datos. Aplicaciones con SPSS. Editorial Prentice Hall. Madrid, 2004.

Permanent International Association of Road Congresses (PIARC). Anticipating the Impact of Climate Change on Road Earthworks.

Permanent International Association of Road Congresses (PIARC). Indicators Representative of the Condition of Geotechnical Structures for Road Asset Management.

RICO A., DEL CASTILLO H. La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Ed. Limusa.

Robert Y. Liang, Ph.D., P.E. Landslide Hazard Rating Matrix and Database, Volume I y II. OHIO Department of Transportation Office of Research and Development. Final report FHWA/OH-2007/18. 2007.

Shyamal Kumar Bhattacharyya. Highway Embankment Design in Bangladesh. School of Civil Engineering. The University of Birmingham. 2009.

SMITH, ROGER; DARTER, MICHAEL Y HERRIN, STANLEY. Highway Pavement Distress Identification Manual for Highway Condition and Quality of Highway Construction Survey. Washington: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.

SUAREZ D. JAIME. Control de Erosión en zonas tropicales. División Editorial y de Publicaciones Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia 2001.

SUAREZ D. JAIME. Deslizamientos: Análisis Geotécnico. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Bucaramanga, Colombia 1998.

THE CENTRAL FEDERAL LANDS HIGHWAY DIVISION (CFLHD). Application of Geophysical Methods to Highway Related Problems. September 2003.

U.S. Army Corps of Engineers. Engineering and Design Geotechnical Investigations. Washington, DC 2001.

WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Maintenance Manual. October 2010.



Carretera Querétaro-Galindo km 12+000
CP 76700, Sanfandila
Pedro Escobedo, Querétaro, México
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610
Fax +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>